

Università degli Studi di Napoli “Federico II”  
Scuola Politecnica e delle Scienze di Base  
Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

**Dipartimento di Fisica “Ettore Pancini”**



*Laurea triennale in Fisica*

**Analisi delle conoscenze di studenti di  
scuola secondaria superiore dopo un  
intervento didattico di meccanica  
quantistica**

**Relatori:**

Prof. Italo Testa  
Prof. Umberto Scotti di Uccio

**Candidato:**

Agostino Cioffi  
N85000372

A.A. 2017/2018

# INDICE

<b><i>Introduzione</i></b>	4
----------------------------	---

## ***Capitolo 1***

### **Principali risultati di ricerca in didattica della meccanica quantistica**

<b>1.1</b> Ricerca in didattica della Fisica	5
<b>1.2</b> Ricerca in didattica della meccanica quantistica	6
<b>1.2.1</b> Principali difficoltà degli studenti in meccanica quantistica	7
<b>1.2.2</b> Principali strategie didattiche sviluppate per superare le difficoltà degli studenti in meccanica quantistica	8

## ***Capitolo 2***

### **Proposta di un segmento didattico di meccanica quantistica per V liceo**

<b>2.1</b> Razionale del percorso	13
<b>2.2</b> Principi generali della proposta didattica	13
<b>2.3</b> Fasi del percorso proposto	14
<b>2.4</b> Questionario di valutazione	22
<b>2.5</b> Descrizione dettagliata del questionario	23
<b>2.5.1</b> I quesiti sul regime classico	23
<b>2.5.2</b> I quesiti sulla meccanica dei quanti	25
<b>2.5.3</b> I quesiti sulla misura	27
<b>2.5.4</b> I quesiti sulla fisica dell'atomo e del legame chimico	28
<b>2.5.5</b> I quesiti sulle proprietà elettroniche della materia	29

## ***Capitolo 3***

### **Validazione del percorso**

#### **3.1 Dati**

3.1.1	Risultati degli studenti della scuola secondaria	32
3.1.2	Risultati degli studenti del terzo anno di Fisica	36
3.1.3	L'analisi delle percezioni della difficoltà e dell'ambiguità delle domande	42
3.1.4	Idee dei docenti del corso di laurea in Fisica sulla didattica della Meccanica quantistica	45
3.2	Interviste ai docenti	46
	<b>Conclusioni</b>	51
	<b>Bibliografica</b>	52
	<b>Ringraziamenti</b>	54

## **Introduzione**

Questo lavoro di tesi è centrato sulla didattica della fisica quantistica per studenti di V Liceo Scientifico. Con l'evoluzione della scienza è cambiata anche la didattica, sia per forma che per contenuto. Esistono diversi modi di introdurre e di approcciare la fisica quantistica che la rendono un vero e proprio argomento di cultura generale; le complessità sia formali che concettuali della disciplina ne accentuano l'interesse sotto il profilo didattico.

La ricerca in esame è composta principalmente da tre stadi: un primo stadio in cui vengono presi in esame i risultati di studi precedenti condotte da vari gruppi di ricerca, al fine di costruire una prima versione del percorso didattico; segue un secondo stadio della ricerca in cui il percorso viene ridefinito e implementato con una platea scolastica: infine, nella parte conclusiva, vengono esaminati i risultati e valutata l'efficacia della proposta didattica. Verranno qui presentati i principi alla base della progettazione del percorso e i risultati ottenuti con una classe pilota composta da 15 studenti appartenenti a sezioni diverse dello stesso istituto. Il numero esiguo della popolazione studentesca rende impossibile un'analisi statistica rigorosa riguardante il rendimento e l'efficacia del percorso didattico strutturato, ma ci fornisce ugualmente importanti informazioni. Tuttavia, per aumentare la validità della ricerca si sono confrontati i risultati ottenuti da studenti del terzo anno del corso di laurea in Fisica sulle stesse domande di verifica somministrate agli studenti di liceo al termine dell'implementazione del percorso. Infine, il percorso e le domande di verifica sono state validate mediante interviste a docenti del corso di laurea in fisica dell'Università di Napoli "Federico II" al fine di evidenziare eventuali criticità.

La tesi presenta una suddivisione in tre capitoli. Nel primo capitolo si introduce il tema della didattica nei suoi scopi e significati, la didattica viene presentata inizialmente in forma generale e successivamente approfondita prima come didattica della fisica e in particolare come didattica della meccanica quantistica. Nel secondo capitolo si presenta il percorso didattico nella sua forma e contenuto, descrivendo le fasi del percorso proposto e il questionario di validazione. Nel terzo capitolo sono presentati i metodi di validazione del percorso e i risultati sperimentali ottenuti.

# Capitolo 1

## Principali risultati di ricerca in didattica della meccanica quantistica

### 1.1 Ricerca in didattica della Fisica

Il termine didattica indica la teoria e la pratica dell'insegnamento. E' da intendere come un ramo della ricerca a sé stante e che in fisica coinvolge gli argomenti trattati in un tipico curriculum scolastico: meccanica classica, statica dei fluidi, fenomeni termici e termodinamica, energia, onde e ottica, elettricità e magnetismo, relatività e quantistica. Come tutti i rami della ricerca scientifica, anche la ricerca in didattica tende ad estendere sempre di più la frontiera della conoscenza, che in questo caso riguarda i meccanismi di ragionamento degli studenti quando incontrano argomenti di fisica e l'influenza su di essi di fattori come ad esempio il lavoro di gruppo, la didattica laboratoriale, le rappresentazioni grafiche o le simulazioni al calcolatore. Poiché l'insegnamento coinvolge principalmente il docente e gli studenti, la didattica in generale e quella della fisica in particolare ha un legame con la psicologia e la pedagogia, in quanto la didattica non può vivere indipendentemente dal particolare contesto educativo.

I ricercatori di didattica della fisica hanno provato varie strade al fine di trovare percorsi e strategie efficaci per elevare la conoscenza media della fisica. Le ultime indicazioni della ricerca didattica, spingono i docenti ad utilizzare approcci di tipo empirico volti a stimolare i ragionamenti degli alunni, facendo in modo che gli stessi studenti focalizzino la propria attenzione non su relazioni o elementi puramente formali ma anche e soprattutto sul fenomeno in esame. Gli allievi devono imparare anzitutto a saper osservare e cogliere nel fenomeno gli aspetti e i parametri realmente significativi. Dall'osservazione, con l'ausilio dell'insegnante, lo studente può formulare le prime ipotesi ed escogitare modi per verificarne la validità e ricavare modelli matematici per descrivere ciò che accade ed il comportamento del sistema nel futuro. La fisica non è più intesa come una sezione isolata della conoscenza, ma il docente deve incentivare, senza forzarne l'interpretazione, collegamenti interdisciplinari e richiami costruttivi a esperienze di vita quotidiana.

## 1.2 Ricerca in didattica della meccanica quantistica

Come detto in precedenza, la didattica ha il compito di minimizzare quanto più possibile concezioni erranee e di rafforzare le competenze legate all'apprendimento disciplinare. La fisica quantistica è un argomento estremamente ampio e articolato in cui possiamo individuare principalmente tre diversi ambiti teorici: la fisica dei quanti, la meccanica quantistica, la teoria quantistica dei campi e il modello standard. L'insegnante viene dunque posto dinanzi ad una serie di scelte didattiche, nessuna univocamente considerata più efficace e giusta dell'altra. Lo stesso insegnamento della fisica del XX secolo al Liceo è argomento di discussione proprio per le difficoltà che presenta. Se nel piano didattico si ritiene opportuno includere la fisica quantistica, si rende necessario rilegarle un ruolo ben definito.

Ci sono essenzialmente due modi di introdurre la meccanica quantistica in un programma di scuola secondaria superiore: la si può presentare alla fine dell'intero percorso scolastico o revisionare l'intero percorso di studi rendendone la fisica del XX secolo l'apice. Dopo aver scelto il ruolo e quindi il rilievo e lo spazio che occuperà nel programma scolastico, è necessario che il docente effettui una seconda scelta legata alla vastità dell'argomento; l'ambito da approfondire. Una trattazione sulla fisica dei quanti in genere include argomenti come il problema dello spettro del corpo nero, la spiegazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico, il problema degli spettri atomici discreti, il modello atomico di Bohr, l'ipotesi ondulatoria di de Broglie, l'effetto Compton. Un percorso di questo tipo semplifica il formalismo a vantaggio degli aspetti concettuali e del significato degli esperimenti, che sono basati su una strumentazione non troppo complicata; tuttavia ha il difetto di non affrontare il nocciolo concettuale e formale della teoria quantistica.

A differenza della fisica dei quanti, la meccanica quantistica è una teoria sistematica basata su un insieme di principi coerenti e generali e su un formalismo ben definito. Alcuni studiosi come Arons (1992) ritengono non debba essere trattata a livello di scuola secondaria superiore per via della delicatezza concettuale e della difficoltà formale che la caratterizza. Tuttavia il forte ruolo che occupa nella fisica, nella chimica e nelle applicazioni tecnologiche, e lo scorrere del tempo che rende certe teorie e idee sempre più distanti, rendono l'argomento difficilmente rinunciabile nella didattica della scuola secondaria superiore.

Riportiamo nei paragrafi seguenti le principali difficoltà degli studenti rilevate da studi precedenti e una breve rassegna di strategie didattiche innovative finalizzate a superarle.

### 1.2.1 Principali difficoltà degli studenti in meccanica quantistica

In meccanica quantistica, a causa del carattere astratto della disciplina, non si può parlare di preconcizioni errate, ma piuttosto di idee e ragionamenti errati che si sono formati durante lo studio della stessa fisica atomica o di altri argomenti di fisica. Molte idee errate derivano dall'uso di false analogie e dalla tendenza a generalizzare proprietà apprese in un particolare contesto. Gli studenti mostrano particolari difficoltà a comprendere la natura probabilistica della meccanica quantistica, associando il concetto di probabilità a quello di imprecisione della misura. Inoltre si manifesta una tendenza ad incorporare alcuni aspetti della teoria quantistica su un substrato classico, legando ad esempio il principio di Heisenberg a concetti di errori di misura della fisica classica o la probabilità all'imprecisione e alla mancanza di informazioni. Spesso gli studenti non comprendono a fondo la relazione tra variabili complementari. Styer (1996) elenca alcune idee erronee sulla meccanica quantistica, comuni tra gli studenti universitari tra cui:

- gli autostati dell'energia sono i soli stati permessi: tale ragionamento potrebbe essere un effetto del maggior tempo dedicato nei corsi alla ricerca degli autovalori dell'energia
- la funzione d'onda descrive un insieme statistico di sistemi classici oppure la media nel tempo di un sistema singolo
- un sistema con un determinato valore di una componente del momento angolare  $L_z$  ha un valore definito della componente  $L_x$ , ma tale valore cambia continuamente, per cui non si può prevedere il valore di una sua misura; questa idea è favorita dalla descrizione, anche con disegni, del momento angolare come un vettore che ruota intorno all'asse z.

Altre concezioni erronee sono evidenziate in riferimento al dualismo onda-particella; la rappresentazione delle particelle come pacchetto d'onda porta alcuni studenti a pensare che la particella si muova su un percorso ondulato. Per quanto riguarda la descrizione quantistica della struttura atomica, c'è una tendenza interpretativa in termini di orbite con riferimento alle orbite planetarie e al modello atomico di Bhor (Petri, Niedderet, 1998; Muller, Wiesner, 2002; Kalkanis, Hadzidaki, Stavrou, 2003; Ke, Monk, Duschl, 2005). Alcune difficoltà degli studenti nell'apprendere la meccanica quantistica sono causate dalla mancata padronanza di alcuni concetti di fisica classica; ad esempio molti studenti sono convinti che la lunghezza d'onda di De Broglie sia una caratteristica intrinseca di ogni particella, che dipende dalla sua massa ma non dalla sua velocità, e tale ragionamento è probabilmente legato alla mancata comprensione del concetto di quantità di moto

(Vokos et al, 2000); altre gravi difficoltà sono legate alla mancata comprensione di fenomeni di interferenza e diffrazione per le onde.

### **1.2.2 Principali strategie didattiche sviluppate per superare le difficoltà degli studenti in meccanica quantistica**

Alcuni ricercatori (Gianelli, Tarsitani, 2003; Tarsitani 2008 e 2009) propongono di dare rilievo al raccordo tra fisica classica e quantistica e di introdurre già nella fisica classica, idee ed elementi di formalismo che sono tipici della meccanica quantistica, mostrando contemporaneamente limiti e insufficienze della descrizione classica di alcuni fenomeni. Per inserire nello studio della fisica classica elementi formali e concettuali che possano preparare allo studio della meccanica quantistica, questi autori scelgono di trattare fenomeni legati alle onde che sono particolarmente rilevanti nella fisica quantistica. Si sottolinea che i sistemi oscillanti e i fenomeni ondulatori sono sistemi lineari soggetti al principio di sovrapposizione, che è alla base dell'analisi spettrale di una forma d'onda e della sua analisi fenomenologica. Lo scopo è mostrare le caratteristiche di una forma di movimento e di trasferimento di energia che differisce da quella del punto materiale e dei corpi rigidi per aprire la strada verso una descrizione degli stati e dei processi quantistici basata su una analogia formale parziale tra la trattazione classica di sistemi ondulatori e quella di semplici stati quantistici. Il formalismo quantistico viene introdotto tramite modelli classici di sistemi lineari, mostrando che molti aspetti del formalismo della meccanica quantistica, possono essere anticipati sviluppando la struttura matematica di questi modelli classici. Si dà così rilievo al ruolo dei modi normali di oscillazioni che nel caso di sistemi confinati assumono un carattere discreto e si assegna al concetto di stato il significato di configurazione globale del moto, mostrando che lo stato del sistema è sempre una sovrapposizione di modi normali. Queste caratteristiche dei sistemi lineari oscillanti permettono di introdurre terminologie e concetti tipici della meccanica quantistica, come gli autovalori, i valori medi e le relazioni tra le grandezze dei pacchetti d'onda, che conducono alle relazioni del principio di indeterminazione.

Un approccio alternativo, proposto dal gruppo dell'Università di Milano, è legato alla teoria quantistica dei campi e al modello standard. Un percorso incentrato sulla teoria quantistica dei campi ha il vantaggio di evitare molti paradossi tipici della meccanica quantistica e risolve il problema dell'identità e dell'indistinguibilità delle particelle trattandole come quanti di uno stesso campo, indistinguibili tra loro. Proposte didattiche di questo tipo puntano a dare rilievo all'aspetto concettuale della teoria quantistica dei campi come strumento teorico e interpretativo fondamentale

per trattare l'interpretazione tra particelle e il modello standard, in forma esclusivamente qualitativa, oppure introducendo alcuni elementi del suo formalismo fra cui i diagrammi di Feynman.

Il gruppo di ricerca di Udine ha lavorato a lungo sui problemi legati all'insegnamento della meccanica quantistica nella scuola secondaria superiore (Ghirardi, Grassi, Michelini 1997; Michelini et al. 2004; Michelini e Stefanel 2004 e 2010). Il gruppo ha elaborato e sperimentato dettagliatamente un percorso didattico sulla meccanica quantistica che introduce subito alcuni elementi concettuali fondamentali della teoria profondamente diversi sia dalla fisica classica che dalla prima fisica dei quanti. Il percorso vuole aiutare a costruire un pensiero teorico in un contesto fisico specifico (polarizzazione della luce) dove concetti fondamentali della fisica quantistica vengono rappresentati in forma iconografica e matematica e poi li si generalizza a sistemi arbitrari. L'approccio adottato è lontano dal rigoroso formalismo della fisica ondulatoria, troppo elevato e problematico per studenti di scuola secondaria superiore. Il discorso è costruito parlando di fotoni, polarizzati linearmente come particelle che si muovono nello spazio reale mentre la descrizione teorica si basa su vettori in uno spazio astratto. Gli stati di polarizzazione sono descritti da spazi vettoriali di due dimensioni, come lo spin, e ciò semplifica la comprensione delle proprietà degli stati quantici. Si sceglie di trattare subito il concetto di stato quantico e di sovrapposizione di stati grazie ad una fenomenologia che evidenzia in maniera semplice tali concetti. In accordo con questi obiettivi, vengono realizzati alcuni esperimenti sulla polarizzazione della luce con l'utilizzo di filtri polarizzatori e cristalli birifrangenti (calcite): un'esplorazione qualitativa della luce polarizzata linearmente con i filtri Polaroid; la legge di Malus con un sensore di luce; la misura dell'attenuazione trasmessa della luce per motivi non legati alla polarizzazione; lo studio qualitativo della polarizzazione della luce trasmessa da un cristallo birifrangente. La polarizzazione analizzata come proprietà quantistica della luce, permette di introdurre alcuni importanti concetti legati alla meccanica quantistica come il concetto di stato, stati sovrapposti, indeterminismo quantico, la non località, le peculiarità del processo di misura. L'interazione della luce con i Polaroid svolge il doppio ruolo di preparazione e di misura di uno stato di polarizzazione. Le proprietà di polarizzazione vengono rappresentate in maniera iconografica come ad esempio \* (polarizzazione orizzontale),  $\Delta$  (polarizzazione verticale),  $\diamond$  (polarizzazione a  $45^\circ$ ). Si distingue tra proprietà e stato indicando con H e V lo stato dei fotoni associata alla luce polarizzata orizzontalmente e verticalmente mentre ai fotoni polarizzati a  $45^\circ$  si associa lo stato di sovrapposizione H+V. La peculiarità di tale stato emerge quando lo si fa incidere su un Polaroid con direzione permessa o orizzontale o verticale. Solo metà dei fotoni passa, mentre l'altra metà viene assorbito; si nota che stati uguali possono evolvere in maniera diversa, evidenziando il concetto di indeterminismo quantistico.

Ci si concentra in particolar modo sulla distinzione tra miscela statistica di fotoni in due stati diversi e su sovrapposizione di stati, mostrando che alcuni esperimenti non possono essere interpretati come una miscela statistica ma solo come una sovrapposizione di stati. Infatti se si effettua un esperimento con due cristalli birifrangenti di calcite, diretta e inversa, in cui il secondo cristallo è posto in modo da compensare le deflessioni prodotte dal primo: in tal modo tutti i fotoni sono sempre trasmessi mantenendo le loro proprietà. L'analisi di tale esperimento conferma una distinzione tra miscela statistica e sovrapposizione di stati e mostra che non si può attribuire al fotone il concetto classico di traiettoria. Vengono dunque pian piano abbattute eventuali interpretazioni errate (Figura 1.1 e Figura 1.2)

Fotoni polarizzati a  $45^\circ$  che attraversano Polaroid a  $45^\circ$

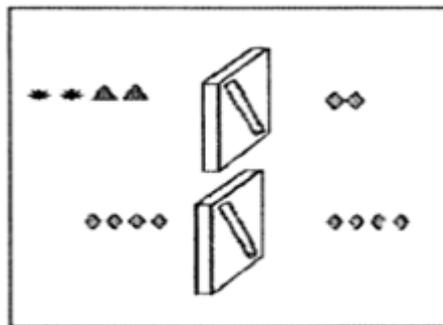


Figura 1.1 : Il caso di una miscela statistica di proprietà e quello di una proprietà specifica danno esiti diversi.

Fonte: Michelini Stefanel (2004)

Esperimento con due cristalli di calcite diretta e inversa e un Polaroid

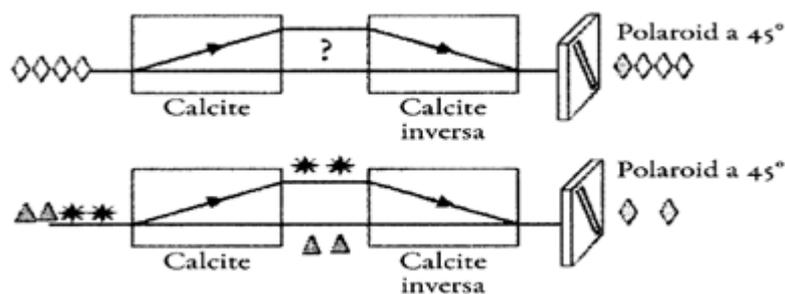


Figura 1.2 : Il risultato è differente nel caso di uno stato di sovrapposizione  $H + V$  o di una miscela  $H U V$ .

Fonte: Michelini, Stefanel (2004)

Si presenta dunque uno schema di ragionamento distante da quello classico e che lega la misura effettuata al concetto di probabilità.

La seconda parte del percorso presenta l'introduzione di alcuni elementi tipici del formalismo quantistico. Si rappresentano gli stati quantistici con vettori unitari in uno spazio vettoriale astratto. Si considerano due polaroid con direzione permessa lungo  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{v}$  formanti un angolo  $\alpha$ , e un rivelatore di fotoni D (Figura 1.3). Secondo la legge di Malus il rapporto tra l'intensità trasmessa da B e quella incidente su B è pari a  $\cos^2\alpha$ . Questo rapporto è interpretato come rapporto tra il numero di fotoni trasmessi e incidenti, quindi nel caso di un esperimento con un fotone singolo viene interpretato come la probabilità del fotone di passare attraverso B,  $P(\mathbf{u},\mathbf{v}) = \cos^2\alpha$  che in considerazione della definizione di prodotto scalare  $\mathbf{u} \cdot \mathbf{v} = \cos \alpha$  la si può rappresentare nella forma

$$P(\mathbf{u},\mathbf{v}) = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{v})^2$$

Situazione con due Polaroid A e B, con direzione permessa lungo i valori  $\mathbf{u}$  e  $\mathbf{v}$ , e un rivelatore di fotoni D

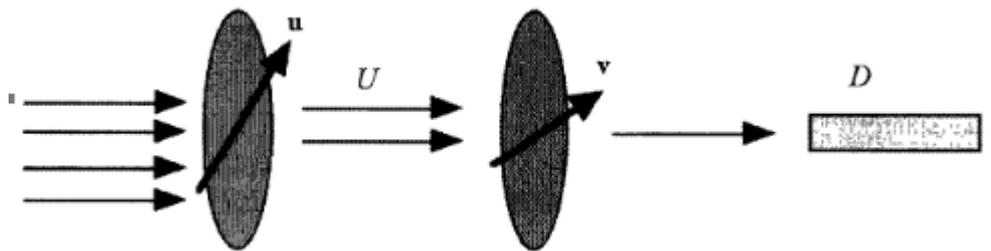


Figura 1.3

Fonte : Michelini, Stefanel (2010)

In modo generalizzato ogni stato rappresentato da un vettore in uno spazio bidimensionale, lo si può scrivere come combinazione lineare di due vettori  $\mathbf{H}$  e  $\mathbf{V}$  nella forma:

$$\mathbf{u} = \psi_1\mathbf{H} + \psi_2\mathbf{V}$$

Per quanto detto prima  $\psi_1^2$  e  $\psi_2^2$  rappresentano le ampiezze di probabilità di trovare il fotone dell'insieme U nello stato H o V.

Si può dunque meglio definire la probabilità del fotone di attraversare B, nella seguente maniera:

$$P(\mathbf{u},\mathbf{v}) = (\mathbf{u} \cdot \mathbf{v})^2 = \psi_1^2 (\mathbf{H} \cdot \mathbf{v})^2 + \psi_2^2 (\mathbf{V} \cdot \mathbf{v})^2 + 2 \psi_1 \psi_2 (\mathbf{H} \cdot \mathbf{v}) (\mathbf{V} \cdot \mathbf{v})$$

Un approccio differente è quello adottato dal gruppo di ricerca di Bologna che ha progettato e sperimentato un percorso didattico basato sugli aspetti problematici della meccanica quantistica legati ai dibattiti sui fondamenti e alle interpretazioni della teoria. Tale approccio non respinge affatto la

complessità formale della nuova teoria anzi respinge artificiose semplificazioni ritenute quasi una forzatura. La complessità e i diversi modi di approcciare e pensare la meccanica quantistica vengono visti come dei valori aggiunti che in qualche modo guidano gli alunni verso la necessità di introdurre nuovi formalismi. Il percorso proposto inizia con un'introduzione storica in cui si pensa al significato di oggetto fisico, presentando i limiti della visione classica di oggetto fisico; si sviluppano quindi alcuni importanti dibattiti di meccanica quantistica come ad esempio il dibattito tra Heisenberg e Bohr sul principio di indeterminazione e la complementarità o tra Bohr e Einstein sul determinismo e il realismo fra Heisenberg e Schrodinger sulla visualizzazione degli oggetti quantistici. Questi dibattiti hanno l'obiettivo di mostrarsi culturalmente rilevanti e significativi a livello cognitivo. La parte finale del percorso propone un'analisi dettagliata dell'esperimento di Stern e Gerlach e di alcuni esperimenti sull'interferenza con doppia fenditura a bassa intensità luminosa.

Questi esperimenti vengono analizzati riprendendo alcuni concetti già introdotti nei discorsi epistemologici discussi in precedenza, come stato quantistico, autostato, autovalore o operatore.

La valutazione dell'ambiente didattico è legata all'intellegibilità a livello di comprensione dei concetti e partecipazione ai dibattiti.

## Capitolo 2

### Proposta di un segmento didattico di meccanica quantistica per il V liceo

#### 2.1 Razionale del percorso

Il percorso è formulato sulla base di questo principio: individuare tra le idee cardine della meccanica quantistica, quelle che appaiono più semplici agli studenti e presentarle per prima, riservando le idee più complesse ad una successiva fase di approfondimento. La discretizzazione dell'energia, l'importanza degli spettri, il principio di indeterminazione, la stabilità atomica e la fisica molecolare sono i concetti su cui è maggiormente focalizzato il programma; sono tutti elementi essenziali per una comprensione concreta di un argomento ampio e complicato.

L'approccio adottato è di tipo fenomenologico; parte da una misura sperimentale della costante di Planck e si riallaccia sequenzialmente alla quantizzazione dell'energia, al principio di indeterminazione, al concetto di orbitale e stabilità atomica e infine a cenni al legame chimico e al modello a bande nei solidi. Il percorso è stato costruito per coprire un periodo di attività scolastica della durata di circa 10 ore e al termine dell'erogazione prevede un ulteriore approfondimento sui temi della meccanica ondulatoria. Poiché precedenti studi di ricerca del gruppo didattico che ha seguito questo lavoro hanno evidenziato che gli studenti presentano particolari difficoltà nell'apprendimento e nella padronanza delle onde, è stato scelto di rimandare la meccanica ondulatoria alla fase di approfondimento.

#### 2.2 Principi generali della proposta didattica

L'idea principale che guida la nostra ricerca è quella di “fare cultura”; la scuola viene considerata come un'istituzione che ha il compito di formare il cittadino e di divulgare cultura in modo non specialistico. Questa constatazione ci ha reso impossibile da prendere in considerazione l'idea di escludere la fisica quantistica da un normale piano didattico e ci ha spinti a ricercare un tipo di didattica non “verticale”, ossia volto a migliorare studenti particolarmente intuitivi e interessati. Si è scelto invece di intraprendere un modo di fare didattica finalizzato a dare in modo efficace idee di base semplici e corrette alla maggiore parte della platea scolastica. Come già detto precedentemente, il formalismo matematico è stato ridotto al minimo e si è prestata più attenzione all'aspetto concettuale. All'interno dell'intero segmento didattico proposto si possono distinguere sostanzialmente quattro diverse aree tematiche: meccanica dei quanti, indeterminazione quantistica e

misura, fisica dell'atomo e del legame chimico, proprietà elettroniche della materia. Si osservi che nel presentare idee così delicate e nuove per gli studenti, si è ritenuto preferibile evitare qualsiasi riferimento a teorie semiclassiche che presentassero gradi di approssimazione e traiettorie ben definite.

### 2.3 Fasi del percorso proposto

Il percorso ha come prerequisiti conoscenze di base di meccanica classica e di elettromagnetismo, necessarie per poter cogliere a pieno le novità delle idee quantistiche. Esso è essenzialmente composto da quattro fasi di seguito denominate TLS#1, TLS#2, TLS#3, TLS#4.

#### *TLS#1*

La prima fase è costruita attorno ad un esperimento emblematico, la misura della tensione di soglia di un LED, che funge da introduzione all'intero percorso e in qualche modo lo anticipa e ne delinea il profilo. In particolare, gli studenti, in autonomia, mediante un circuito serie costituito da un generatore di tensione, una resistenza ed un LED, costruiscono la caratteristica volt-amperometrica del LED facendo variare la tensione di ingresso del generatore e misurando la corrente nel circuito e la tensione ai capi del diodo. L'apparato sperimentale utilizzato è riportato in Figura 2.1.

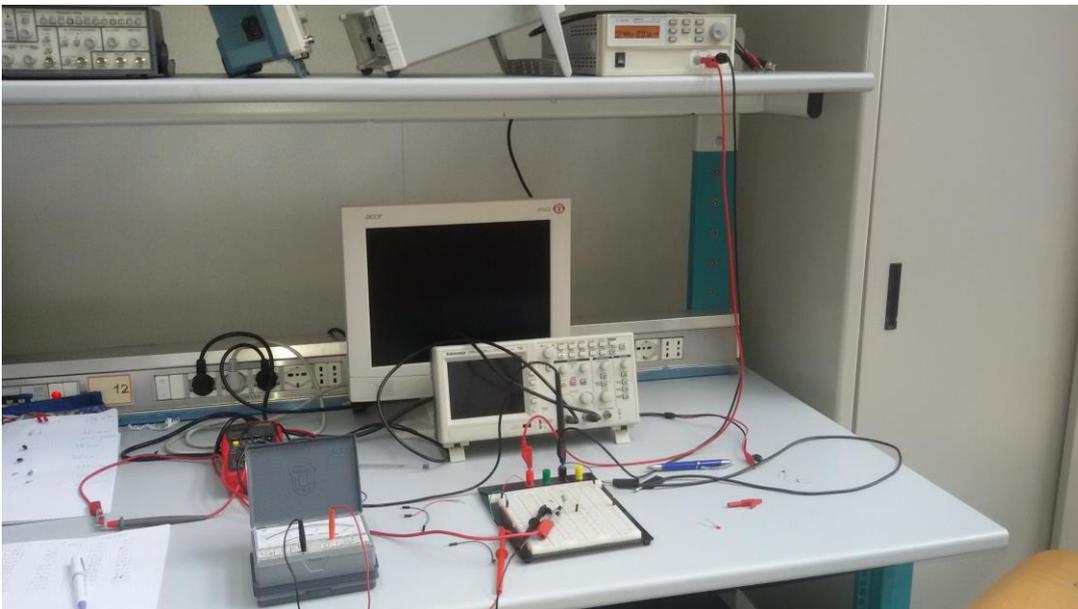


Figura 2.1: setting sperimentale per la misura della caratteristica volt-amperometrica di un LED

Un esempio di dati sperimentali da me misurati è riportato in Figura 2.2 e 2.3

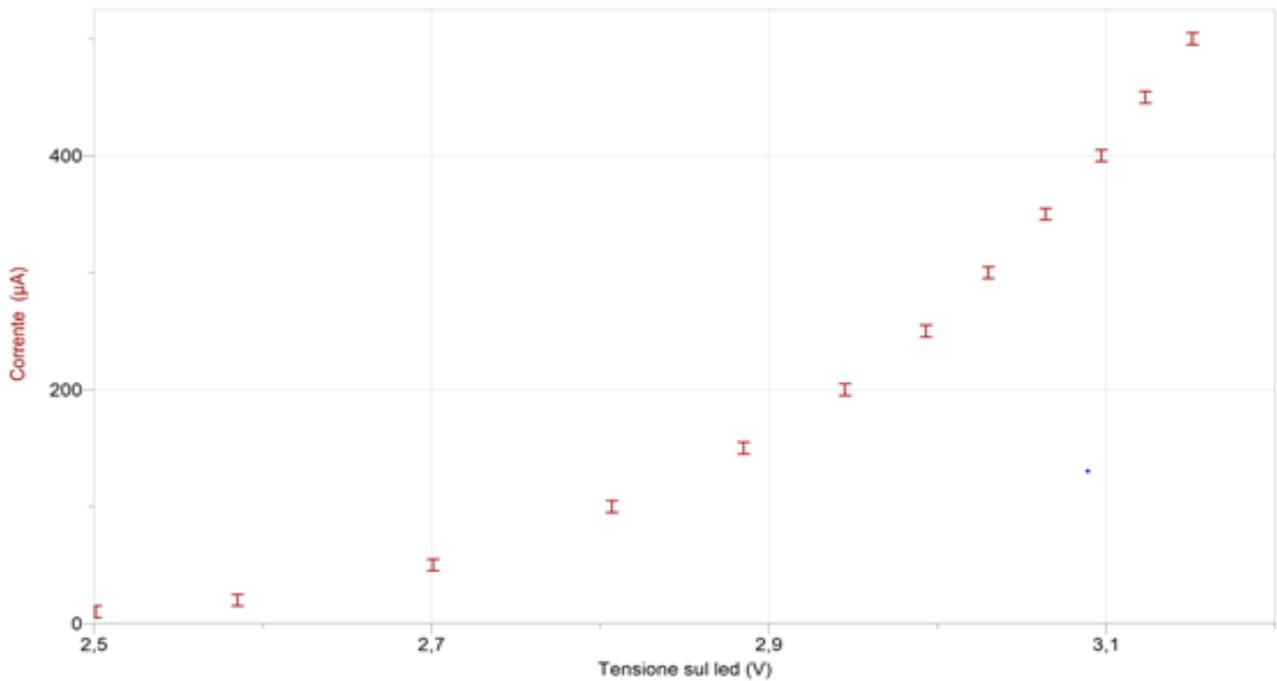


Figura 2.2: caratteristica volt ampertometrica di un led viola (lunghezza d'onda nominale =  $440 \pm 10\%$  nm)

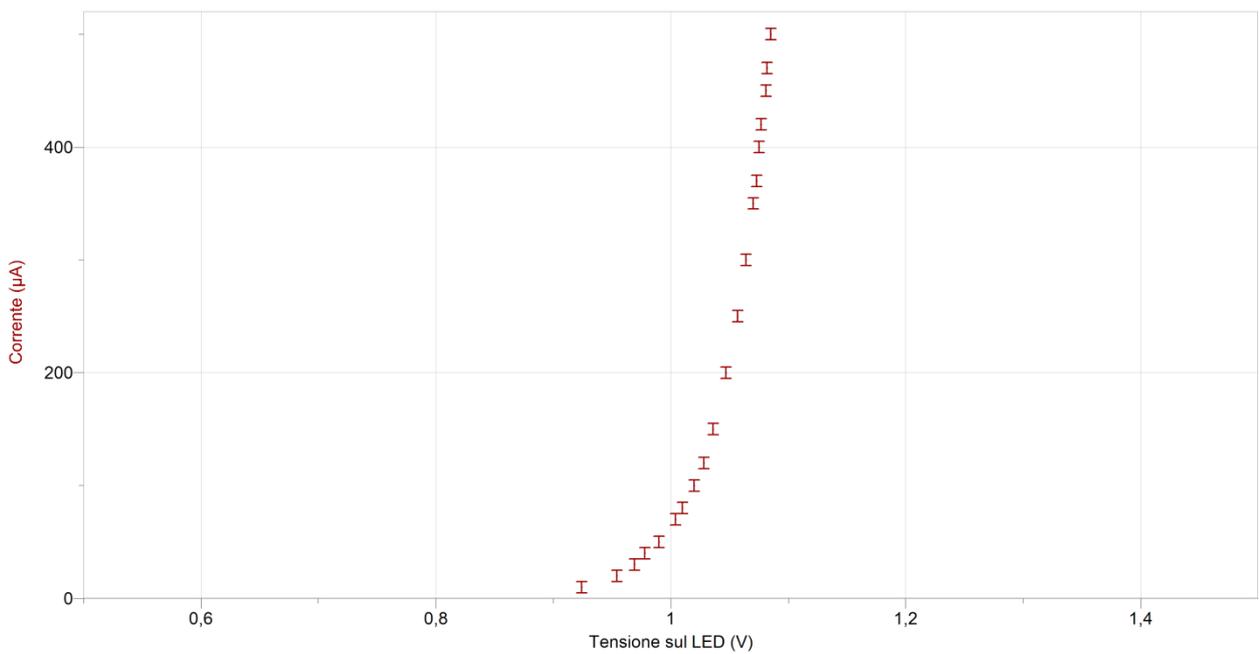


Figura 2.3: caratteristica volt ampertometrica di un led ad infrarosso (lunghezza d'onda nominale =  $940 \pm 10\%$  nm)

Durante l'esperienza, gli studenti possono notare che il LED si accende dopo che ad esso venga applicata una certa tensione, detta appunto di soglia. Graficamente, si fa notare agli studenti che intorno a tale valore di tensione avviene una variazione repentina dell'andamento del grafico. Infatti, agli studenti si suggerisce di suddividere il grafico in due parti: una in cui le tensioni sono minore della tensione di soglia, la seconda in cui le tensioni sono maggiori della stessa. Nella prima parte, il LED non è in conduzione, e quindi questa parte corrisponde alla situazione LED spento. Nella seconda parte, il LED entra in conduzione e la corrente cresce bruscamente, cioè anche a piccole variazioni di V corrispondono grosse variazioni di I. Si fa anche osservare allo studente il modo in cui si "accende" il LED: in particolare, si fa notare che subito diventa luminoso. Dal punto di vista didattico è importante sottolineare il comportamento differente rispetto ad una lampadina che invece cambia colore all'aumentare della tensione. Inoltre questa osservazione rappresenta uno dei punti cruciali dell'intero percorso, perché infatti permette di introdurre, seppur in maniera intuitiva, il concetto di fotone e di spettro, sia nella forma continua (la lampadina) che discreta (il LED).

Si guidano quindi gli studenti ad analizzare la parte della curva voltamperometrica per valori di V maggiori della tensione di soglia e si chiede di approssimarne l'andamento con una curva più semplice, una retta (Figura 2.4)

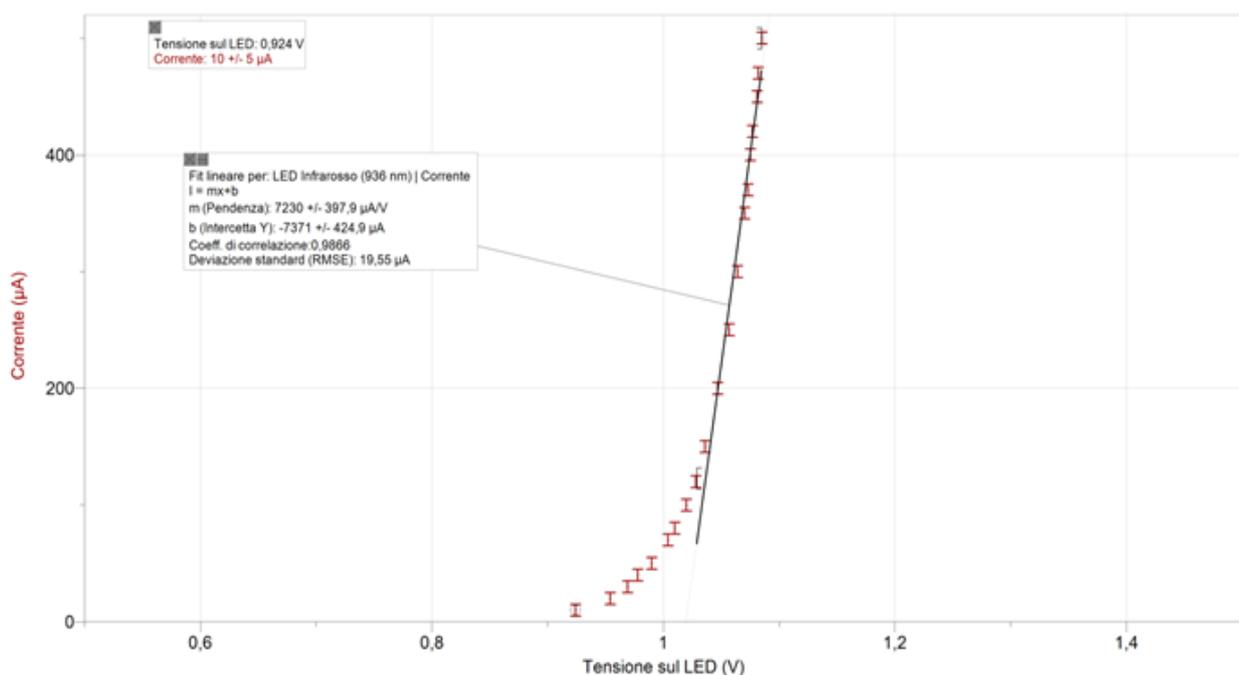


Figura 2.4. Approssimazione lineare della curva va del led ad infrarosso nella regione di conduzione. La retta che meglio approssima l'andamento è  $I = aV + b$  con  $a = (7.2 \pm 0.4) \text{ mA/V}$  e  $b = (-7.4 \pm 0.4) \text{ mA}$

Dalla retta  $I = aV + b$  che approssima i dati corrispondenti alla fase di conduzione si ricava una stima approssimata della tensione di soglia  $V_S$  del LED estrapolando il valore di V quando si impone che la corrente del diodo sia nulla, ricavando quindi che  $V_S = -b/a$ . A titolo di esempio si riporta la misura

che ho effettuato (figura 2.4),  $V_s = 1.02 \pm 0.08$  V dove nella determinazione dell'errore si è tenuto conto della covarianza dei parametri di best fit. Un metodo alternativo per ricavare  $V_s$  potrebbe essere quello di ricavare direttamente dalla curva la cosiddetta "tensione di ginocchio". Quindi, si confrontano i risultati ottenuti dai diversi gruppi di studenti per diversi valori della frequenza emessa dal LED. Le stime ottenute sono riportate in tabella II.1

Tipo LED	Lunghezza d'onda (nm) $\pm 10\%$	Frequenza ( $10^{15}$ Hz) $\pm 10\%$	Tensione di soglia (V)	Errore (V)
Infrarosso	940	0,32	1,02	0,08
Infrarosso 2	980	0,30	1,00	0,09
Violetto 1	436	0,69	2,44	0,09
Blue	480	0,62	2,51	0,08
Rosso	630	0,47	1,75	0,06
Verde	577	0,52	1,76	0,07
Viola	400	0,74	2,79	0,08
Giallo	600	0,50	1,67	0,09

Tabella II.1

Dalla tabella 1, gli studenti possono notare con facilità che la tensione di soglia è diversa a seconda della frequenza del LED. Si guida quindi gli studenti a graficare diversi valori della tensione di soglia in funzione della frequenza della luce emessa (Figura 2.5).

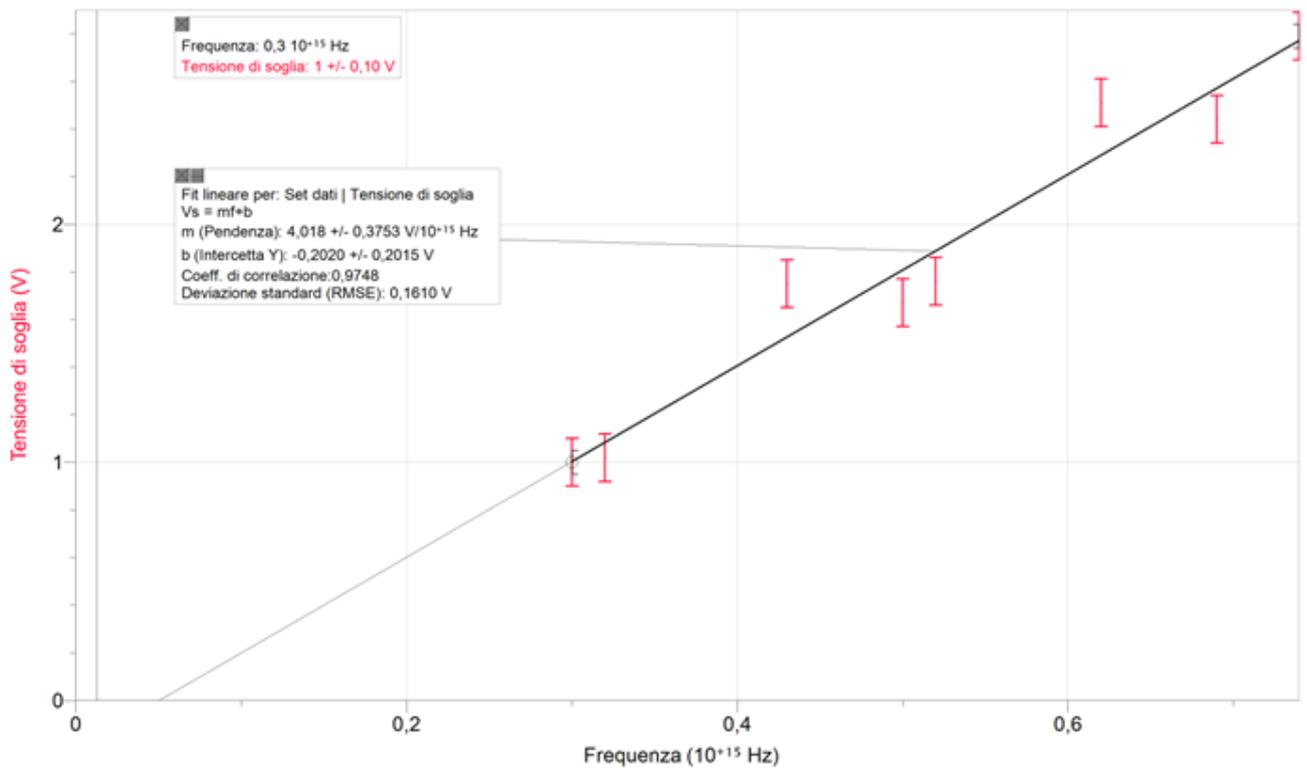


Figura 2.5: Grafico delle tensioni di soglia in funzione delle frequenze dei LED utilizzati nella sperimentazione (vedi Tabella 1)

Dalla figura 2.5 è possibile far notare agli studenti un andamento pressochè lineare della tensione di soglia del LED in funzione della frequenza. Si ottiene una retta di best fit del tipo  $V_s = \alpha \nu + c$ . Per i dati in figura 2.5,  $\alpha = (4,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-15} \text{ V/Hz}$ .

Si discute quindi il significato della costante alfa. Innanzitutto si chiede agli studenti di spiegare il fenomeno osservato. In particolare, si guidano gli studenti a discutere come viene dissipata l'energia persa nel superare la barriera di potenziale corrispondente al valore  $V_s$ . Il modo principale per il LED per dissipare tale energia è trasformare l'energia potenziale elettrica corrispondente alla tensione di soglia in energia luminosa. Si moltiplica quindi primo e secondo membro dell'equazione per la carica dell'elettrone che attraversa la barriera di potenziale del diodo: in tal modo la relazione di best fit diventa  $eV_s = e\alpha\nu + ec$ . Si introduce a questo punto una nuova costante  $h = e\alpha$  che descrive i trasferimenti energetici a livello microscopico. Tale costante, denominata storicamente costante di Planck, ha le dimensioni di un momento angolare e permette di introdurre una nuova grandezza denominata azione, che è il punto di inizio della fase TLS#2. Il valore di  $h$  ottenuto dai dati in figura 5 è pari a  $(6,4 \pm 0,6) \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ .

TLS#2

*Le basi della meccanica quantistica*

Il valore sperimentale della costante di Planck è  $h = 6.67 \times 10^{-34}$  J s.

Notiamo che la combinazione di unità di misura di  $h$  non corrisponde ad alcuna grandezza fisica elementare della Meccanica Classica.

Per comprendere il significato fisico di  $h$  dobbiamo quindi definire una nuova grandezza fisica che abbia le unità di un'energia per un tempo. Per fortuna non occorre una definizione molto rigorosa.

Si introduce quindi l'azione meccanica  $S$  caratteristica di un sistema, definita come il prodotto della sua energia caratteristica  $E$  per un intervallo di tempo caratteristico  $t$ :

$$S = E t \quad [S] = [E] [t] = J s$$

Per esempio, una particella di massa  $m$  che si muove a velocità costante  $v$  per un tempo  $\Delta t$  compie un'azione meccanica

$$S = \left( \frac{1}{2} m v^2 \right) \Delta t$$

Nel caso in esame per un elettrone che attraversa la giunzione del LED l'energia caratteristica è  $eV_s$ , come tempo caratteristico si può considerare il periodo  $T$  della radiazione emessa quando il LED è in conduzione con  $T = \frac{1}{\nu}$ . L'azione compiuta è quindi:

$$S_e = \frac{eV}{\nu}$$

Ma si è visto in precedenza grazie all'esperimento descritto in TLS#1 che il prodotto  $\frac{eV}{\nu}$  è proprio  $h$  per cui si conclude che l'azione meccanica dell'elettrone che attraversa la giunzione del LED è proprio  $h$ .

E' possibile estendere a questo punto il concetto di azione anche ad altri sistemi. Ad esempio le polveri sottili inquinanti sono distinte al diametro dei granelli. Le polveri  $PM_{10}$  hanno diametro inferiore a 10  $\mu m$ .

Per una particella  $PM_{10}$  di massa  $m = 2 \times 10^{-15}$  kg che si muove alla velocità  $v = 10^{-3}$  m s<sup>-1</sup> per un tempo  $\Delta t = 1$  s l'energia caratteristica è

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = 10^{-21} J$$

Il tempo caratteristico è  $\Delta t = 1 \text{ s}$  quindi l'azione compiuta è:  $S_p = E \Delta t = 10^{-21} \text{ J s}$

Quindi sulla base degli esempi precedenti si invitano gli studenti a confrontare il valore dell'azione meccanica nei casi micro e macro. In particolare si fa notare che l'azione meccanica dell'elettrone nel LED è di 13 ordini di grandezza più piccolo di quello del granello  $\text{PM}_{10}$ . Quindi si conclude che un'azione meccanica dell'ordine di  $h$  è certamente molto piccola rispetto all'azione meccanica dei fenomeni macroscopici e che si può distinguere il mondo "macro" dal mondo "micro" proprio stimando le azioni meccaniche: l'azione meccanica  $S$  dei sistemi macroscopici è sempre molto più grande di  $h$  mentre l'azione meccanica  $S$  dei sistemi microscopici è circa dell'ordine di  $h$ .

Si guidano infine gli studenti a ricavare un'espressione alternativa per l'azione dei sistemi in particolare si fa notare che

$$[S] = [E] [t] = \text{J s} = \text{N m s} = (\text{N s}) \text{ m}$$

Ricordiamo che  $(\text{N s})$  è l'unità di misura della quantità di moto  $p$ . Da questa osservazione possiamo scrivere  $S = E t$ , l'azione meccanica  $S$  caratteristica di un sistema è definita anche come il prodotto della sua quantità di moto caratteristica  $p$  per una sua lunghezza caratteristica  $x$ :  $S = p x$

### *TLS#3*

Le potenzialità delle nuove idee della meccanica quantistica vengono sviluppate più in dettaglio nella terza fase, in cui entra in gioco la struttura atomica. Considerazioni sull'atomo, legate a quanto appreso nelle fasi precedenti, in particolare al principio di indeterminazione, sono finalizzate a correggere l'idea erronea di modello planetario dell'atomo e contemporaneamente sottolineano una forte differenza concettuale tra fisica classica e quantistica sul concetto di traiettoria. Gli studenti infatti vengono guidati a ragionare sull'impossibilità di definire una legge deterministica in senso classico per la meccanica quantistica; non si può definire alcuna legge che legghi una precisa posizione ad un preciso istante di tempo. La relazione di inversa proporzionalità che lega le grandezze fisiche di posizione e velocità viene presentata anche graficamente tramite l'ausilio di mappe a falsi colori che mostrano con efficacia sia la densità di probabilità di trovare una delle due grandezze fisiche sia il significato concreto di relazione di proporzionalità inversa tra due distribuzioni. Le conoscenze in qualche modo intuitive e nozionistiche di chimica vengono utilizzate per implementare e sviluppare concetti quantistici. Le stesse mappe a falsi colori introdotte per

spiegare qualitativamente la densità di probabilità di ottenere una misura assumono un aspetto molto più tecnico e profondo quando vengono trasposte sugli orbitali in relazione alla configurazione elettronica dell'atomo. Gli studenti mostrano di avere una discreta confidenza con la configurazione elettronica, la loro attenzione viene dunque concentrata su una rappresentazione grafica dei vari livelli energetici permessi all'elettrone. La discretizzazione dei livelli viene presentata come fatto sperimentale giustificato ad esempio da tutto ciò che la Chimica ha dimostrato. L'alunno viene guidato a ragionare sull'energia emessa dall'elettrone in uno stato eccitato e su eventuali "tracce" che questi lascia, deve quindi comprendere la necessità e il significato dell'introduzione degli spettri che vanno assunti come elementi fondamentali nell'indagine della materia, è infatti grazie agli spettri, a queste tracce energetiche che ad esempio ci è possibile indagare la natura degli astri. Il salto energetico riprende dunque il concetto già introdotto di fotone, che diviene dunque idea chiave necessario a spiegare l'emissione di energia da parte della materia.

#### *TLS#4*

Nella quarta fase del percorso ci si sofferma sulle proprietà elettroniche dei materiali e sul loro funzionamento. Questa scelta segue principalmente due diversi obiettivi: richiamare l'esperienza di laboratorio presentata all'inizio dello stesso percorso, rafforzando un legame di continuità tra le varie fasi e dare una maggiore consapevolezza degli argomenti affrontati, offrendo una visione di insieme e un'interpretazione concreta della meccanica quantistica evidenziandone la presenza nella vita quotidiana.

Gli studenti nella fase precedente hanno avuto modo di riflettere sulla struttura atomica e sul concetto di orbitale. In questa fase si estendono le idee e le conclusioni, ricavate per un singolo atomo, a gruppi di atomi. In particolare, facendo leva sulle conoscenze di chimica riguardanti i legami atomici, si amplia il concetto di orbitale introducendo l'orbitale molecolare. Ci si domanda quindi se un elettrone può muoversi su qualsiasi orbitale e se ci siano in qualche modo dei vincoli. Le riflessioni sono inizialmente di carattere macroscopico e rendono evidente che non tutti i materiali presentano le stesse caratteristiche elettroniche. Basti pensare a conduttori e isolanti: infatti, i primi sono caratterizzati da una grande mobilità elettronica che permette loro di condurre corrente elettrica, mentre nei secondi c'è una limitazione al moto degli elettroni. Gli alunni vengono guidati alla conclusione che esiste un qualche potenziale energetico che separa i vari stati dell'elettrone. Una trattazione basata sui comportamenti macroscopici di conduttori, semiconduttori e isolanti è

importante per meglio delineare il ruolo del quanto energetico necessario per spiegare il funzionamento del diodo. Il diodo viene presentato in modo elementare, descrivendo la giunzione pn come una barriera di potenziale per gli elettroni. Quel che inizialmente nella prima fase era stato discusso in maniera qualitativa, come l'emissione del fotone dal diodo, assume qui una concezione più completa, legata a tensioni di soglia, livelli energetici e barriere di potenziale.

## 2.4 Questionario di valutazione

Una valutazione più quantitativa dell'efficacia del percorso è stata effettuata mediante un questionario strutturato nella maniera seguente: 22 domande a risposta multipla, divise secondo le diverse fasi del programma, con ogni quesito che offre 4 alternative di risposta. La percezione di difficoltà e ambiguità delle domande è stata misurata mediante due scale Likert su 5 livelli.

Le aree in cui i quesiti sono suddivisi sono:

- Regime semiclassico (prerequisiti): 3 quesiti
- Meccanica dei Quanti (TLS#1): 6 quesiti
- Misura (TLS#2): 4 quesiti
- Fisica dell'atomo e del legame chimico (TLS#3): 4 quesiti
- Proprietà elettroniche della materia (TLS#4): 5 quesiti

Le quattro alternative sono state progettate secondo le seguenti tipologie:

- a) Corretta
- b) Parziale
- c) Ragionamento classico
- d) Errata senza giustificazione

Due metodi sono stati adottati per valutare numericamente le risposte al questionario. Nel primo metodo, alle risposte di tipo a) sono stati assegnati 3 punti, a quelle di tipo b) 2 punti, a quelle di tipo c) 1 punto, a quelle di tipo d) 0 punti. Con questo metodo numerico, detto di "credito" parziale, il

punteggio massimo è 66. Nel secondo metodo, si assegna punteggio pieno (1 punto) solo alle risposte di tipo a) e quindi il punteggio massimo è 22.

Il questionario è finalizzato a misurare l'efficacia del percorso nel suo insieme e di ogni fase. Il questionario serve quindi non solo a valutare i progressi degli studenti ma anche ad analizzare in maniera critica il percorso. Inoltre correlando le risposte ai vari quesiti con la percezione di ambiguità e difficoltà si può ricostruire un profilo del livello raggiunto dai singoli studenti e della coerenza e accettabilità del questionario.

## 2.5 Descrizione dettagliata del questionario

Come già anticipato il questionario è composto da 22 quesiti raggruppati per argomento secondo il seguente schema:

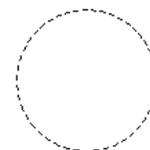
- Regime classico (3 quesiti : 5 – 9 – 21 )
- Meccanica dei quanti (6 quesiti: 1 – 3 – 7 – 10 – 13 – 19 )
- Misura (4 quesiti : 4 – 6 – 16 – 18 )
- Fisica dell'atomo e del legame chimico (4 quesiti: 8 – 12 – 15 – 20 )
- Proprietà elettroniche della materia (5 quesiti 2 – 11 – 14 – 17 – 22 )

Verranno ora riportati i singoli quesiti secondo questo raggruppamento. Per comodità, le opzioni di risposta sono qui ordinate secondo lo schema a-b-c-d

### 2.5.1 Quesiti sul regime semiclassico

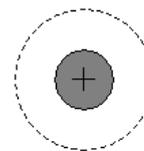
**5. In figura è mostrata la traiettoria di un elettrone che si muove in regime classico. Allora:**

- a) è possibile che l'elettrone segua questa traiettoria in un campo magnetico uniforme, a patto che siano trascurabili tutti i meccanismi di perdita di energia;
- b) si tratta di un moto circolare uniforme in presenza di un campo magnetico perpendicolare al piano della figura;
- c) è impossibile che l'elettrone segua una traiettoria, perché l'elettrone è una particella quantistica;
- d) è impossibile che l'elettrone segua una traiettoria circolare sotto l'azione esclusiva di un campo elettrico.



**9. In figura è mostrata la traiettoria di un elettrone che si muove in regime classico intorno a una carica positiva. E' possibile che la traiettoria sia stabile nel tempo?**

- a) no: l'elettrone emette radiazione elettromagnetica, perdendo energia fino a cadere sulla carica positiva;
- b) sì, perché il moto di una carica in un campo elettrico radiale somiglia a quello di un pianeta intorno al Sole;
- c) no: è sempre impossibile determinare la traiettoria di un elettrone;
- d) no: la forza elettrostatica della carica positiva attrae l'elettrone, facendogli perdere energia fino a farlo cadere.



**21. Quando si calcola l'energia di un elettrone in un atomo non si tiene conto dell'attrazione gravitazionale da parte del nucleo, perché:**

- a) la forza di attrazione gravitazionale è di molti ordini di grandezza più piccola della forza di Coulomb;
- b) gli elettroni hanno una massa molto minore di quella del nucleo;
- c) la forza di attrazione gravitazionale è bilanciata dalla forza centrifuga dovuta alla rotazione dell'elettrone;
- d) l'energia nucleare è sufficiente per attrarre gli elettroni, cosicché si può trascurare l'energia gravitazionale.

I quesiti sono volti a valutare la conoscenza degli studenti dei modelli semiclassici dell'atomo. Tali modelli potenzialmente possono aiutare a comprendere l'importanza e la necessità di un nuovo formalismo e di una nuova fisica capace di descrivere il mondo microscopico. I quesiti proposti vogliono in qualche modo chiarire gli ordini di grandezza delle forze in gioco (quesito 21) e il comportamento semiclassico di un elettrone, (quesiti 5 e 9).

Nel quesito 5, la risposta corretta tiene conto che sotto l'azione di un campo magnetico perpendicolare al piano della traiettoria e nel caso in cui non vi siano perdite energetiche che facciano degenerare la stessa traiettoria, questa rimane circolare. Tra le alternative, la b) non tiene conto delle perdite energetiche legate al ragionamento classico e che farebbero degenerare la traiettoria, la c) crea un contrasto morfologico mettendo in discussione la traccia del quesito

Nel quesito 9 la risposta corretta tiene conto di un ragionamento classico in cui la perdita di energia fa collassare l'elettrone sulla carica positiva con un moto a spirale. L'alternativa b) presenta un parallelismo con le orbite planetarie facendo pensare che l'orbita possa rimanere stabile, la c) risponde in maniera quantistica ad una domanda semiclassica

Infine nel quesito 21 la risposta corretta tiene conto degli ordini di grandezza delle forze in gioco marcandone il peso all'interno di un fenomeno fisico. La risposta b) non è una causa diretta del motivo per cui non viene considerata l'energia di attrazione del nucleo, la risposta c) riporta la tipica misconcezione per cui in un moto circolare vi è equilibrio tra la forza centripeta e la forza centrifuga

## 2.5.2 I Quesiti sulla meccanica dei quanti

### 1. La costante di Planck:

- a) è essenziale per spiegare l'emissione di radiazione da parte della materia;
- b) è una costante fenomenologica;
- c) va aggiunta alle altre costanti universali quando si usano le leggi di Newton per il moto dell'elettrone;
- d) ha le unità di misura di una potenza elettrica.

### 3. Come si spiega l'emissione di luce da parte di una lampadina a incandescenza?

- a) è una successione di processi in cui sono emessi fotoni di diversa lunghezza d'onda;
- b) è un processo nel quale i fotoni emessi cambiano lunghezza d'onda a causa della temperatura elevata;
- c) è un processo dovuto all'emissione di onde elettromagnetiche, a differenza di ciò che accade nei LED;
- d) è un processo nel quale i fotoni non sono emessi dalla corrente elettrica della lampadina.

### 7. Due impulsi di luce dello stesso colore trasportano la stessa energia $E_{tot}$ . Allora:

- a) i due impulsi contengono lo stesso numero di fotoni;
- b) l'energia di ciascun impulso è data dal prodotto della costante di Planck per la frequenza;
- c) l'energia dei fotoni trasportati da ciascun impulso dipende dall'intensità della radiazione elettromagnetica;
- d) l'impulso che dura di più contiene più fotoni;

### 10. L'azione meccanica di un elettrone:

- a) assume valori dell'ordine della costante di Planck  $h$  nei processi microscopici;
- b) assume valori dell'ordine della costante di Planck solo nei processi di emissione e assorbimento di un fotone;
- c) è utile a caratterizzare come cambia la quantità di moto di un elettrone in funzione della posizione;
- d) si conserva quando agiscono solo forze conservative.

### 13. L'energia del fotone:

- a) dipende dal colore della radiazione elettromagnetica;
- b) è molto piccola;
- c) è determinata dall'intensità della sorgente;
- d) a parità di lunghezza d'onda, dipende dal tipo di sorgente.

### 19. Un atomo può emettere un fotone di energia $h\nu$ ...

- a) solo se si trova in uno stato eccitato;
- b) quando un elettrone oscilla alla stessa frequenza  $\nu$ ;
- c) quando un elettrone è fortemente accelerato, perché una carica accelerata irraggia onde elettromagnetiche;
- d) dopo aver assorbito quello stesso fotone.

Si nota come le domande sono poste in modo da evidenziare l'importanza della costante di Planck nella nuova teoria (quesito 1) e allo stesso tempo a puntualizzare alcune importanti nozioni di fisica come costante universale e fenomenologica, si cerca inoltre di portare lo studente a ragionare sull'unità di misura della stessa costante e sul suo significato fisico. I quesiti numero 3-7-10-13 sono concentrati sulla relazione intercorrente tra energia e lunghezza d'onda, presentando allo stesso tempo dei riferimenti alla spettroscopia, più evidenti nel quesito 19.

Nel quesito 1 La risposta b) viene considerata parziale in virtù della differenza presente tra costante fenomenologica legata alla singola esperienza di laboratorio o propria di un materiale esclusiva, e costante universale valida invece a prescindere dal singolo strumento scelto di utilizzare. La risposta c) fa invece riferimento alle leggi di Newton e della meccanica classica, la costante di Planck è invece fondamentale per la meccanica quantistica e la descrizione del mondo microscopico, la risposta d) fa riferimento alla natura fisica della grandezza  $h$  a cui associa unità di grandezza del tutto errate.

Nel quesito 3 la risposta corretta è a) in cui si fa per l'appunto riferimento al meccanismo di funzionamento di una lampadina in cui l'alta temperatura accelera gli elettroni in tutte le direzioni facendogli emettere luce sotto forma di fotoni di diversa lunghezza d'onda. La risposta b) è considerata parziale, gli elettroni subiscono a causa della temperatura un'accelerazione ed emettono luce sotto forma di onda elettromagnetica, i fotoni già emessi non cambiano energia e comunque la variazione di lunghezza d'onda è legata alla variazione di temperatura più che alla temperatura. La risposta c) chiama in causa il meccanismo di emissione del fotone nel LED, la cui differenza principale viene presentata riguardante il tipo di spettro più che in base al meccanismo di emissione.

Nel quesito 7 la risposta corretta è la a) si ragiona sull'espressione  $E = nh\nu$  e si osserva che a parità di energia e di frequenza deve essere necessariamente uguale anche il numero di fotoni. La risposta b) differisce dalla risposta corretta perché ignora il numero di fotoni di ciascun impulso, diventa quindi una risposta incompleta, la risposta c) lega l'energia dei fotoni all'intensità luminosa, l'energia dei fotoni dipende dalla frequenza e non dall'intensità.

Nel quesito 10 la risposta corretta a) in cui un processo viene definito microscopico in base al valore che assume l'azione meccanica. L'opzione b) è concettualmente troppo limitativa, la risposta c) è invece legata alla legge oraria

Nel quesito 13 la risposta corretta a) semplicemente lega il colore alla frequenza di emissione del fotone. La risposta b) non stabilisce termini di paragone con altre grandezze caratteristiche del sistema, la risposta c) lega l'energia all'intensità luminosa che invece non è legata alla frequenza ma bensì al numero di fotoni che riescono ad attraversare una sezione unitaria in una unità di tempo. La d) lega invece l'energia alla natura della sorgente indipendentemente dalla frequenza di emissione.

Nel quesito 19 la risposta b) fa riferimento al vecchio modello di Thompson (atomo come oscillatore armonico) , la risposta c) considera in maniera classica il problema, in cui l'atomo può irradiare energia pur rimanendo sul medesimo orbitale cosa che non può accadere. La risposta d) segue un ragionamento di "restituzione del fotone" ed è la risposta completamente errata.

### 2.5.3 I Quesiti sulla Misura

#### 4. In base al Principio di Heisenberg:

- a) se si misura con sufficiente precisione la posizione di un elettrone, se ne altera certamente la velocità;
- b) non si può conoscere con precisione assoluta nessuna grandezza fisica;
- c) la meccanica classica non fornisce strumenti per misurare contemporaneamente la posizione e la velocità di un elettrone con sufficiente precisione;
- d) l'errore di sensibilità degli strumenti di misura di posizione e velocità di un elettrone sono inversamente proporzionali.

#### 6. Il Principio di Heisenberg afferma che:

- a) tanto meglio conosciamo la velocità di un elettrone, tanto peggio ne conosciamo la posizione;
- b) se misuriamo posizione e velocità di un elettrone, gli errori di misura non dipendono dagli apparati sperimentali, ma da una legge fondamentale della Natura;
- c) la legge oraria di un elettrone è sempre affetta da errori di misura;
- d) è impossibile effettuare misure precise di posizione e velocità dell'elettrone.

#### 16. Ciascuna funzione d'onda di un elettrone:

- a) permette di calcolare le indeterminazioni ( $\Delta x$  e  $\Delta p$ , per esempio) che compaiono nel principio di Heisenberg;
- b) permette di determinare tutti gli stati permessi all'elettrone;
- c) permette di determinare la traiettoria più probabile dell'elettrone;
- d) non è una grandezza fisica, perché non può essere misurata.

#### 18. La stabilità dell'atomo si spiega affermando che:

- a) per il principio di indeterminazione, è impossibile che l'elettrone si fermi sul nucleo;
- b) l'energia degli elettroni dell'atomo è quantizzata;
- c) le traiettorie degli elettroni sono associate agli orbitali;
- d) gli elettroni oscillano intorno al nucleo.

La misura quantistica è da considerarsi un argomento concettualmente molto lontano dalle idee classiche e delicato al tempo stesso, specie per l'introduzione della funzione d'onda e del concetto di orbitale. In particolare si vuol verificare se gli studenti siano in grado di interpretare e di accettare l'idea di probabilità in meccanica quantistica o se siano ancora legati a ragionamenti classici che legano l'indeterminazione all'errore sperimentale o alla mancanza di strumenti appropriati (quesiti 4-6). Si vuole inoltre verificare se gli studenti siano riusciti a superare concettualmente le idee relative al determinismo meccanico e a sostituire dunque l'idea di traiettoria all'idea di orbita (quesiti 16 – 18)

Nel quesito 4 la risposta b) è parziale per via del suo carattere troppo generale. La risposta c) è legata ad un ragionamento che si sofferma sugli strumenti di misura ignorando quindi l'essenza del principio.

Nel quesito numero 6 la risposta corretta esprime semplicemente una conseguenza del principio di Heisenberg per le grandezze fisiche di velocità e posizione. La risposta b) è vera ma non da alcuna informazione sul significato del principio di indeterminazione, la c) introduce ragionamenti classici legati alla legge oraria del moto dell'elettrone entrando quindi in contrasto con l'ambiente quantistico che stiamo analizzando. La risposta d) è molto vaga riguardo al termine "precise".

Nel quesito numero 16 la risposta corretta è la a) che collega il significato della funzione d'onda in termini di probabilità al principio di Heisenberg. La risposta b) serve a verificare se lo studente è in grado di identificare i termini funzione d'onda e stato. La risposta c) introduce il concetto classico di traiettoria.

Nel quesito numero 18 la risposta corretta, la a) fa riferimento all'impossibilità di definire una posizione con precisione assoluta per l'elettrone che quindi non può trovarsi sul nucleo. La risposta b) richiama la discretizzazione dei livelli, che è vera ma non è la causa della stabilità, perché non esclude l'esistenza di un ipotetico primo livello corrispondente all'elettrone fermo sul nucleo. La risposta c) richiama il concetto classico di traiettoria.

#### *2.5.4 I Quesiti sulla Fisica dell'atomo e del legame chimico*

**8. Quale di queste affermazioni è corretta?**

- a) il raggio medio di un atomo è determinato solo dagli orbitali degli elettroni di valenza;
- b) atomi e ioni hanno lo stesso raggio medio se hanno lo stesso numero di protoni;
- c) il raggio medio di un atomo è il raggio dell'orbita degli elettroni di valenza;
- d) il raggio medio di un atomo è proporzionale al numero atomico.

**12. Riguardo agli orbitali, si può affermare che:**

- a) quando c'è un legame chimico, gli orbitali possono estendersi su molti atomi adiacenti;
- b) hanno dimensioni microscopiche;
- c) sono descritti correttamente dalla meccanica classica solo se hanno dimensioni macroscopiche;
- d) gli orbitali 1s hanno dimensioni uguali in tutti i diversi atomi, e così anche i 2s, 2p, ecc..

**15. Per un atomo qualsiasi:**

- a) ad ogni orbitale corrisponde un valore costante di energia meccanica dell'elettrone;
- b) ad ogni orbitale corrisponde un valore costante di energia cinetica dell'elettrone;
- c) gli orbitali sono le orbite percorse dagli elettroni che ruotano intorno al nucleo con energia meccanica costante;

- d) visto che la sua massa è trascurabile, in tutti gli orbitali atomici l'energia potenziale dell'elettrone è trascurabile e quindi l'energia meccanica è tutta cinetica.

**20. La funzione d'onda di un elettrone permette di stabilire:**

- a) con che probabilità si possa ottenere sperimentalmente un certo valore per la quantità di moto dell'elettrone;
- b) l'errore di misura della quantità di moto dell'elettrone;
- c) la quantità di moto dell'elettrone in funzione del tempo;
- d) la posizione più probabile dell'elettrone, ma non dà informazioni sulla quantità di moto.

I quesiti sono principalmente incentrati sul concetto di orbitale sia in relazione alle dimensioni che assume (quesiti 8-12) sia in relazione al suo significato; si vuol verificare se lo studente sia riuscito ad acquisire sia il significato dello stesso orbitale in termini di energia (quesito 15) che in relazione al legame che assume con la funzione d'onda (quesito 20)

Nel quesito 8 la risposta corretta è la a) dove per l'appunto sono gli elettroni sui livelli più esterni a determinare un valore medio del raggio. La risposta b) è considerata parziale perché lega il raggio esclusivamente ai nucleoni, la risposta c) richiama il ragionamento classico parlando di orbita mentre la d) ignora gli orbitali.

Nel quesito 12 la risposta b) fa riferimento ad orbitali atomici considerando solo regioni di spazio con una probabilità significativa di trovare l'elettrone. La risposta c) fa nuovamente riferimento a schemi classici di descrizione del moto degli elettroni mentre la risposta d) lega gli orbitali a misure spaziali anziché probabilistiche/energetiche.

Nel quesito 15 la risposta b) è parziale, perché l'energia da considerare è meccanica, e non ci si riferisce solo all'energia cinetica. La risposta c) richiama nuovamente il concetto classico di orbita.

Nel quesito 20 la risposta a) riferita al modulo quadro della funzione d'onda è corretta. La risposta b) è considerata parziale perché permette di stabilire solo il limite quantistico, cioè inferiore. La risposta c) richiama la possibilità di costruire una legge oraria per l'elettrone mentre la d) va in contrasto con il principio di Heisenberg

### *2.5.5 I Quesiti sulla Proprietà elettroniche della materia*

**2. Quale di queste affermazioni che riguardano le proprietà dei metalli è corretta?**

- a) gli elettroni liberi di muoversi in un metallo hanno orbitali di dimensioni macroscopiche;
- b) in un metallo (come, ad esempio, Cu) tutti gli elettroni sono liberi di muoversi;

- c) in un metallo gli elettroni si muovono di moto uniformemente accelerato tra un urto e l'altro;
- d) gli elettroni di conduzione in un metallo urtano contro gli ioni.

**11. Esponiamo un metallo a una carica elettrica esterna negativa. Allora:**

- a) gli orbitali profondi restano inalterati;
- b) una parte degli elettroni di ciascun orbitale si sposta dal lato opposto;
- c) tutti gli elettroni si muovono in direzione opposta alla carica esterna;
- d) le cariche positive del metallo si spostano verso la carica esterna.

**14. Quale di queste affermazioni che riguardano le proprietà degli isolanti è corretta?**

- a) Durante l'irraggiamento con fotoni di energia opportuna, un isolante può condurre corrente elettrica;
- b) gli isolanti non hanno la banda di conduzione;
- c) gli elettroni degli isolanti sono fermi;
- d) negli isolanti, le cariche si spostano da un atomo all'altro seguendo le linee del campo elettrico applicato.

**17. In un semiconduttore:**

- a) il numero di cariche libere di muoversi può essere modificato;
- b) le particelle con carica positiva e quelle con carica negativa si muovono in verso opposto;
- c) la corrente elettrica può scorrere in un solo verso;
- d) non vale la legge di Ohm, perché la corrente non è proporzionale alla differenza di potenziale applicata.

**22. In un LED, l'emissione di luce:**

- a) è dovuta alla ricombinazione tra elettroni e lacune;
- b) è un processo nel quale non c'è conservazione dell'energia;
- c) è dovuta al riscaldamento della giunzione tra due semiconduttori con diverso drogaggio;
- d) il colore della luce emessa dipende dalla tensione applicata.

Quest'ultima sezione si alle conoscenze di chimica degli studenti e agli elementi di struttura della materia presenti nel percorso

Nel quesito 2 la risposta b) è ritenuta parziale perché non tiene conto della differenza dei vari livelli energetici, non tutti gli elettroni hanno la stessa possibilità di muoversi. La risposta c) richiama il ragionamento classico in cui dopo un urto l'elettrone accelera in maniera uniforme.

Nel quesito 11 la risposta a) considera gli effetti schermanti degli elettroni esterni e di come gli elettroni più interni restino quasi inalterati. La risposta b) non tiene conto del fatto che gli elettroni degli orbitali interni non si spostano. La risposta c) tiene ancora meno conto della differenza di interazione tra elettroni esterni e interni. La d) è errata poiché considera il moto di cariche positive all'interno dell'atomo.

Nel quesito 14 la risposta la risposta corretta è la a) che fa riferimento alla reale struttura degli isolanti. La risposta b) è considerata parziale perchè cita le bande ma in una maniera errata. La risposta c) riabbraccia un ragionamento classico secondo cui se non c'è corrente, le cariche sono ferme.

Nel quesito 17 la risposta corretta è la a) fa riferimento al doping. La risposta b) è data parziale in quanto le particelle con carica positiva non sono definite. La risposta c) confonde un circuito con un diodo

Nel quesito 22 la risposta corretta è la a) che definisce il fenomeno in base alla ricombinazione tra lacune ed elettroni i quali passando da una orbita all'altra emettono energia sotto forma di fotone. La risposta b) è parziale perché parla di energia ma in modo sbagliato c) confonde il meccanismo del LED con quello di una lampadina a incandescenza. La risposta d) si discosta invece dalle proprietà intrinseche del materiale e lega il colore della luce del LED solamente alla tensione applicata.

## Capitolo 3

### Validazione del percorso

Il percorso è stato validato con 15 studenti dell'ultimo anno di scuola secondaria superiore. (gruppo di trattamento). I risultati di apprendimento di questo gruppo sono stati confrontati con quelli di un gruppo di controllo, composto da 54 studenti del terzo anno del corso di laurea in Fisica triennale. Il gruppo di controllo aveva seguito il corso di Istituzioni di Fisica Teorica e Struttura della Materia. I risultati sono stati analizzati utilizzando entrambi i metodi di valutazione descritti nel capitolo precedente – credito parziale e dicotomico. Le differenze tra i due gruppi sono state analizzate tramite il test di Student.

### 3.1 Dati

#### 3.1.1 Risultati degli studenti della scuola secondaria

Utilizzando il metodo di valutazione dicotomico (1 punto → risposta corretta, 0 punti → tutte le altre risposte) il punteggio medio del gruppo di trattamento è stato  $10 \pm 1$  su un massimo di 22 (punteggio normalizzato:  $0.45 \pm 0.05$ ). La distribuzione è riportata in Figura 3.1.

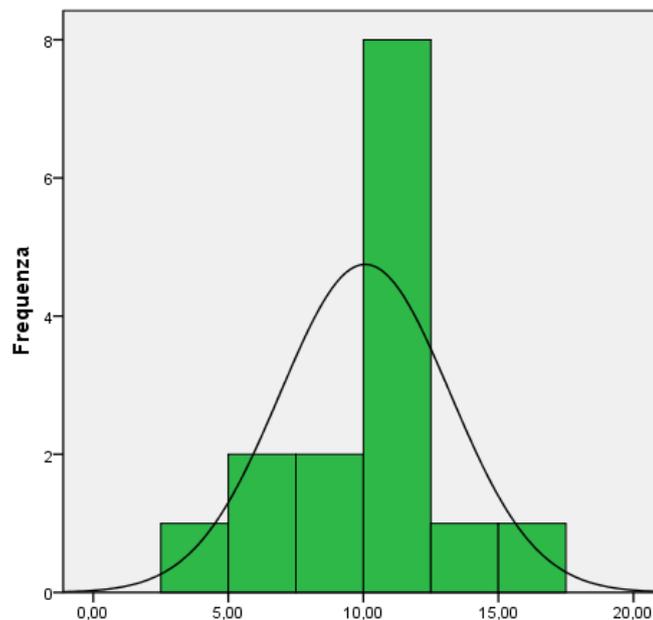


Figura 3.1 Distribuzione dei punteggi ottenuti dal gruppo di trattamento mediante metodo di valutazione dicotomica (N = 15)

Si nota che tale distribuzione assume una forma ragionevole in cui il grosso degli studenti ottiene punteggi circa sufficienti, mentre solo una piccola percentuale di essi ottiene risultati scarsi o eccellenti.

Utilizzando il metodo di valutazione a credito parziale, il punteggio medio è  $44 \pm 5$  su un massimo di 66 (punteggio normalizzato:  $0.67 \pm 0.08$ ). La distribuzione dei punteggi è riportata in Figura 3.2

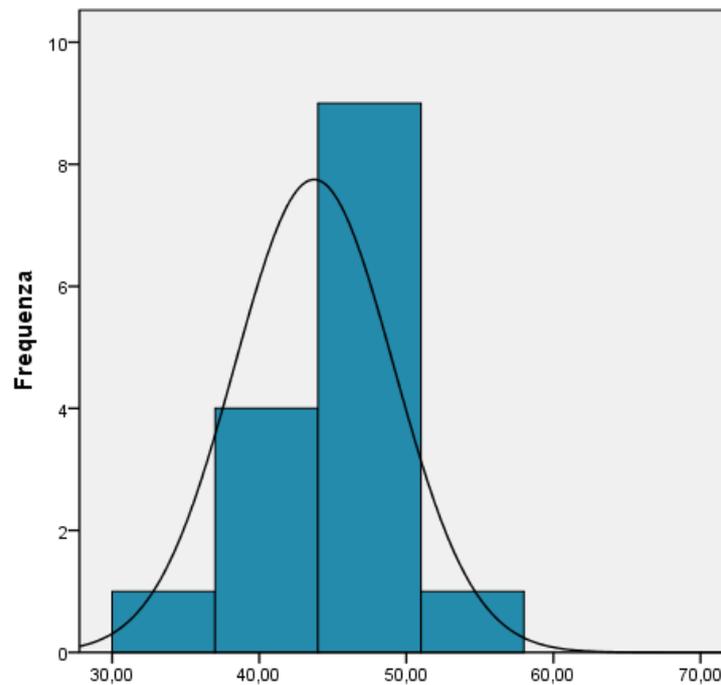


Figura 3.2 Distribuzione dei punteggi ottenuti dal gruppo di trattamento mediante metodo di valutazione a credito parziale (N = 15)

È immediato osservare come anche questa nuova distribuzione abbia una forma regolare e piuttosto simmetrica ma a differenza della distribuzione precedente questa si mostra più stretta e centrata a destra del valor medio della scala di valutazione.

Questa evidenza suggerisce che il punteggio a credito parziale è più favorevole agli studenti rispetto a quello dicotomico. Ciò può essere dovuto ad una maggiore frequenza di risposte parziali o di tipo classico in alcune delle domande del questionario. In tabella III.1 riportiamo la distribuzione dei diversi tipi di risposta per tutte le domande del questionario.

	a) corretta (%)	b) parziale (%)	c) ragionamento classico (%)	d) errata (%)
--	-----------------	-----------------	------------------------------	---------------

<i>Regime semiclassico</i>				
Q5	0	26,7	60,0	13,3
Q9	0	0	86,7	13,3
Q21	80,0	20,0	0	0
<i>Meccanica dei quanti</i>				
Q1	100	0	0	0
Q3	0	86,7	0	13,3
Q7	13,3	86,7	0	0
Q10	26,7	53,3	13,3	6,7
Q13	33,3	53,3	13,3	0
Q19	26,7	6,7	6,7	60,0
<i>Misura</i>				
Q4	100	0	0	0
Q6	20,0	0	0	80,0
Q16	80,0	6,7	0	13,3
Q18	66,7	26,7	6,7	0
<i>Fisica dell'atomo e del legame chimico</i>				
Q8	13,3	66,7	6,7	13,3
Q12	46,7	13,3	20,0	20,0
Q15	86,7	6,7	0	6,7
Q20	53,3	6,7	33,3	6,7
<i>Proprietà elettroniche della materia</i>				
Q2	100	0	0	0
Q11	33,3	6,7	6,7	53,3
Q14	60,0	26,7	6,7	6,7
Q17	53,3	6,7	26,7	13,3
Q22	13,3	6,7	53,3	26,7

Tabella III.1

Si nota immediatamente che la percentuale di risposte di tipo b) e c) superano il 30% per tutti i temi. Per il tema regime semiclassico e meccanica dei quanti tale percentuale supera il 50%. In figura 3.3 riportiamo le percentuali medie delle 4 tipologie di risposte suddivise per i temi del questionario. Dal grafico emerge che il tema con la percentuale maggiore di risposte corrette è quello della misura, quello con la percentuale più bassa quello del regime semiclassico.

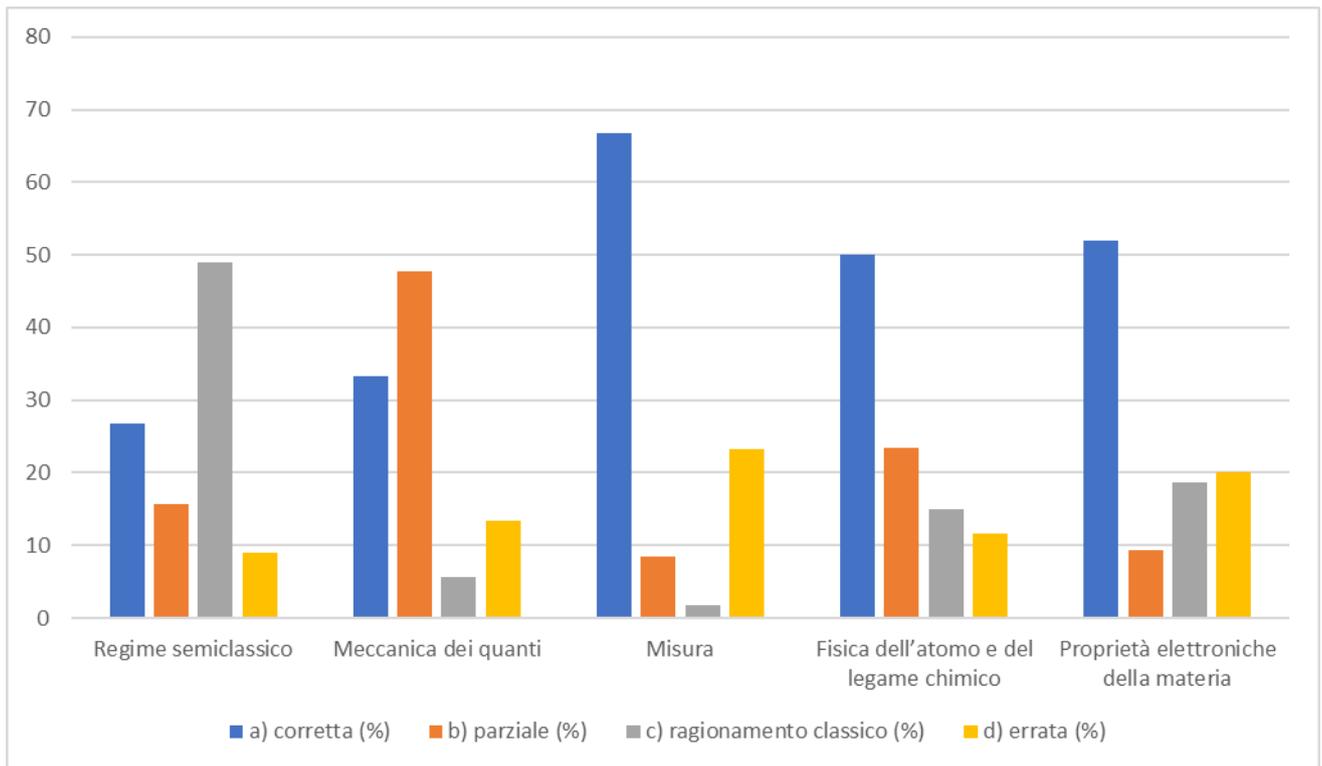


Figure 3.3. Percentuale media delle 4 tipologie di risposte per i temi trattati nel questionario (gruppo di trattamento)

Il valore del coefficiente di difficoltà delle domande, ossia la percentuale di risposte corrette di ogni quesito, è riportato in Figura 3.4.

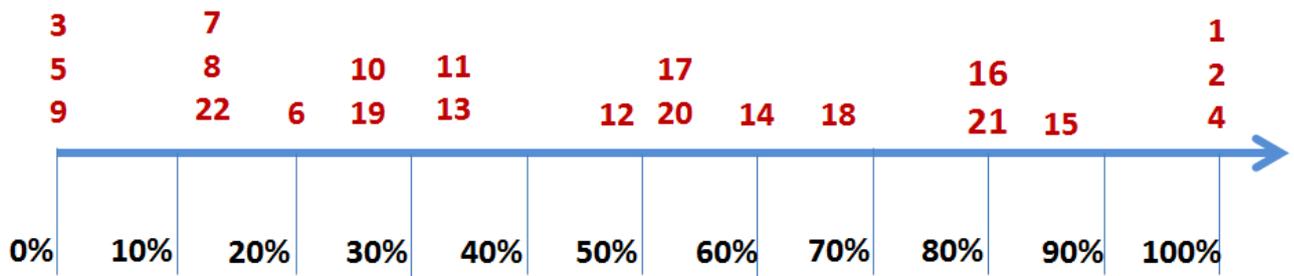


Figura 3.4 Distribuzione delle domande del questionario secondo le loro difficoltà (gruppo di trattamento)

In genere si considera accettabile una percentuale di risposte corrette compresa tra il 20% e 80%. Quesiti con percentuali di risposte corrette al di fuori di tale intervallo sono eccessivamente facili o eccessivamente difficili. Nel nostro caso sono risultati molto facili i quesiti Q1, Q2, Q4 e Q15, molto difficili i quesiti Q3, Q5, Q9, Q7, Q8, Q22. Notiamo che i quesiti Q3 e Q5, per i quali nessuno studente ha risposto correttamente, hanno come argomento il regime semiclassico.

Per studiare in maniera più quantitativa la distribuzione delle risposte sui temi trattati nel questionario, riportiamo in Figura 3.5 il punteggio medio normalizzato degli studenti del gruppo di

trattamento per ogni tema, utilizzando entrambi i metodi di valutazione (credito parziale e dicotomico).

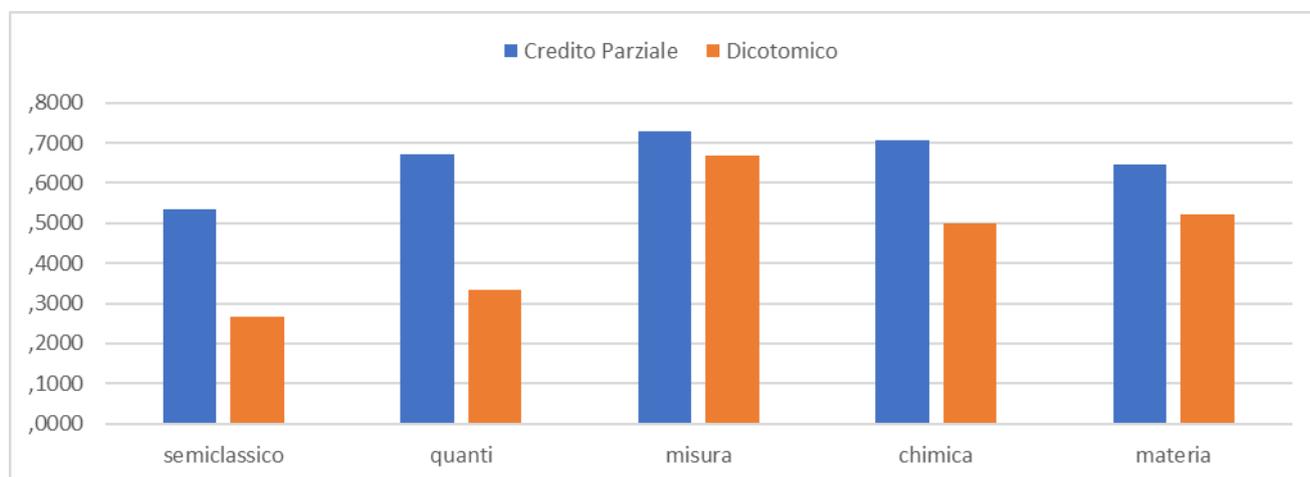


Figura 3.5 Punteggi medi normalizzati ottenuti dal gruppo di trattamento nelle aree del test utilizzando i due metodi di valutazione

I punteggi normalizzati nel caso della valutazione a credito parziale confermano che il regime semiclassico è stata l'area più difficile per gli studenti (media =  $0.53 \pm 0.11$ ). L'area più facile è stata quella della misura (media =  $0.73 \pm 0.15$ ). Le differenze tra le varie aree del questionario tuttavia non sono statisticamente significative utilizzando questo metodo di valutazione ( $F = 0.286$ ,  $p = 0.869$ ).

Anche i punteggi normalizzati utilizzando il metodo dicotomico confermato che l'area più difficile è stata quella del regime semiclassico (media =  $0.27 \pm 0.46$ ), mentre quella più semplice quella della misura (media =  $0.67 \pm 0.34$ ). Anche con questo metodo di valutazione, le differenze tra i punteggi medi del questionario non sono statisticamente significative ( $F = 0.828$ ,  $p = 0.525$ ).

### 3.1.2 Risultati degli studenti del terzo anno di fisica

Il campione di controllo era costituito da 54 studenti frequentanti il Terzo anno del CS di Fisica. Utilizzando il metodo di valutazione dicotomico (1 punto → risposta corretta, 0 punti → tutte le altre risposte) il punteggio medio del gruppo di controllo è stato  $11 \pm 3$  su un massimo di 22 (punteggio normalizzato:  $0.52 \pm 0.14$ ). Pur se maggiore di quello ottenuto dagli studenti del gruppo di trattamento, la differenza non è statisticamente significativa ( $t = -1.670$ ,  $df = 67$ ,  $p = 0.100$ ). La distribuzione è riportata in Figura 3.6.

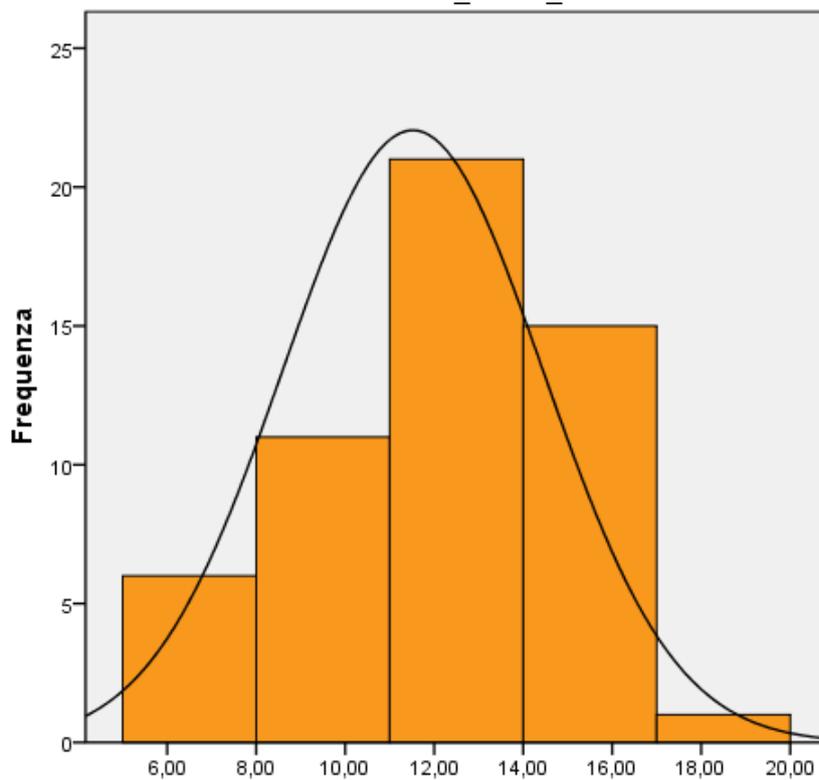


Figura 3.6 Distribuzione dei punteggi ottenuti dal gruppo di controllo mediante metodo di valutazione dicotomica (N = 15)

Utilizzando il metodo di valutazione a credito parziale, il punteggio medio è  $45 \pm 6$  su un massimo di 66 (punteggio normalizzato:  $0.69 \pm 0.09$ ). Anche in questo caso il valore è leggermente maggiore di quello ottenuto dal gruppo di trattamento, ma le differenze non sono statisticamente significative ( $t = -0.906$ ,  $df = 67$ ,  $p = 0.368$ ). La distribuzione dei punteggi è riportata in Figura 3.7. Notiamo che anche per il gruppo di controllo, il metodo di valutazione a credito parziale è più favorevole agli studenti.

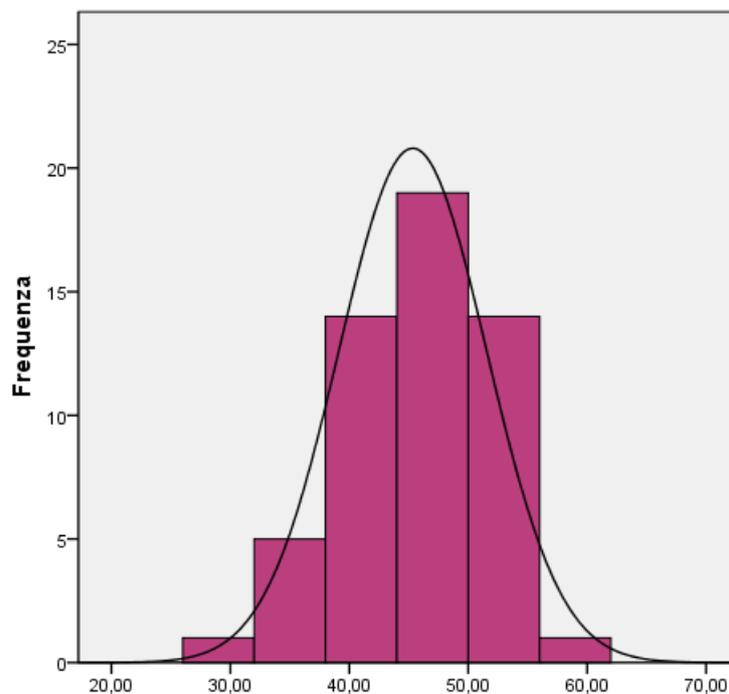


Figura 3.7 Distribuzione dei punteggi ottenuti dal gruppo di controllo mediante metodo di valutazione a credito parziale (N = 54)

In tabella III.2 riportiamo la distribuzione dei diversi tipi di risposta per tutte le domande del questionario.

	a) corretta (%)	b) parziale (%)	c) ragionamento classico (%)	d) errata (%)
<i>Regime semiclassico</i>				
Q5	57,4	24,1	9,3	9,3
Q9	70,4	5,6	0	24,1
Q21	92,6	3,7	1,9	1,9
<i>Meccanica dei quanti</i>				
Q1	81,5	11,1	0	7,4
Q3	64,8	20,4	5,6	9,3
Q7	38,9	44,4	9,3	7,4
Q10	42,6	24,1	5,6	27,8
Q13	90,7	0	7,4	1,9
Q19	70,4	1,9	1,9	25,9
<i>Misura</i>				
Q4	59,3	11,1	9,3	20,4
Q6	81,5	13,0	0	5,6
Q16	22,2	18,5	13,0	46,3
Q18	5,6	83,3	7,4	3,7
<i>Fisica dell'atomo e del legame chimico</i>				
Q8	27,8	9,3	27,8	35,2
Q12	22,2	59,3	0	18,5
Q15	79,6	5,6	9,3	5,6
Q20	59,3	3,7	1,9	35,2

Proprietà elettroniche della materia				
Q2	13,0	14,8	31,5	40,7
Q11	18,5	33,3	31,5	16,7
Q14	35,2	31,5	16,7	16,7
Q17	68,5	9,3	3,7	18,5
Q22	50,0	1,9	25,9	22,2

Tabella III.2

Notiamo che la percentuale di risposte corrette è superiore al 60% per i temi del regime semiclassico e della meccanica dei quanti, mentre è inferiore al 50% per i temi della misura, dei legami con la chimica e delle proprietà della materia (vedi figura 3.8). Tale risultato è molto differente rispetto a quanto ottenuto con il campione di trattamento.

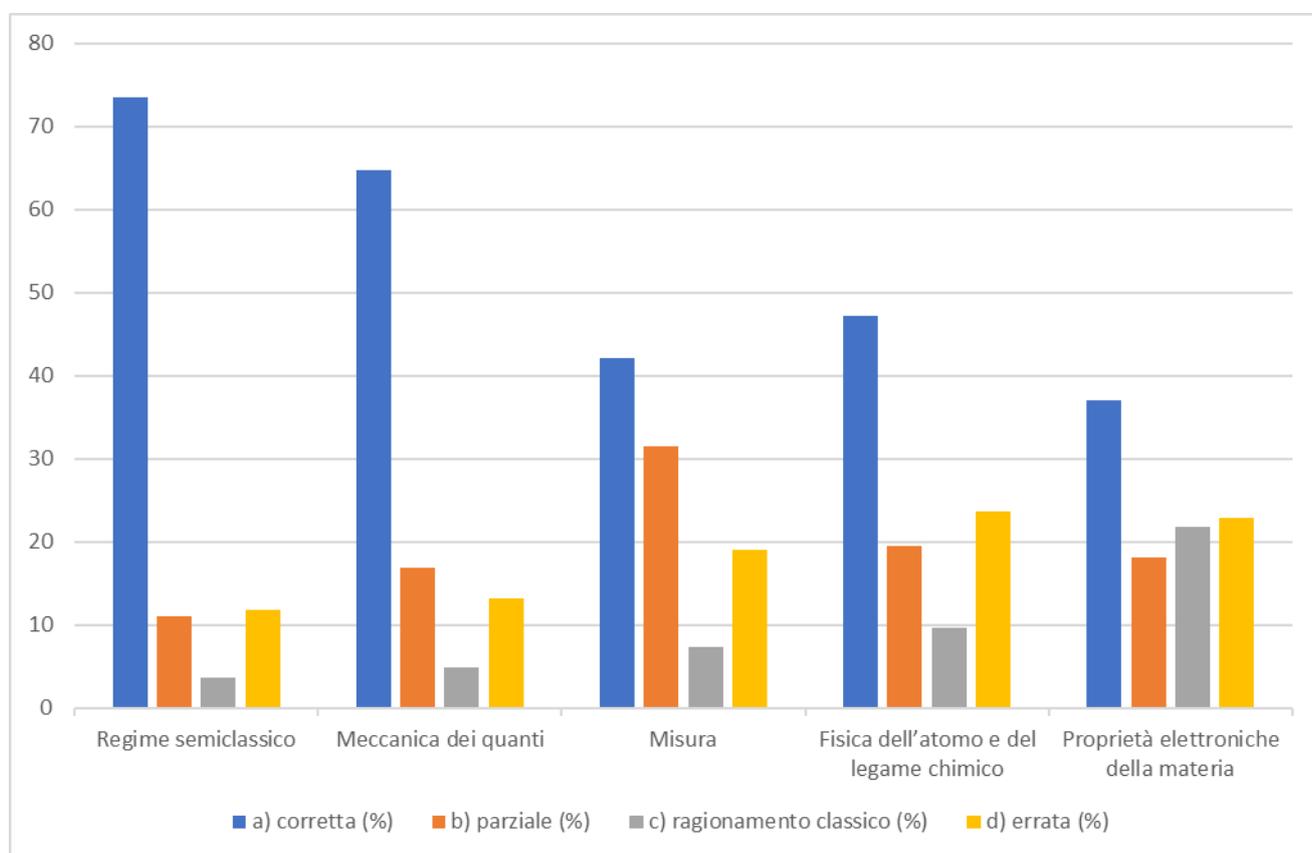


Figure 3.8. Percentuale media delle 4 tipologie di risposte per i temi trattati nel questionario (gruppo di controllo)

Per indagare quantitativamente questi risultati, riportiamo in tabella III.3 i valori del test t per i temi affrontati nel questionario, utilizzando entrambi i metodi di valutazione

	Metodo a credito parziale		t	Metodo dicotomico		t
	Trattamento	Controllo		Trattamento	Controllo	

<i>Regime semiclassico</i>	0.53±0.11	0.82±0.21	-7,003*	0.27±0.14	0.74±0.29	-8.883*
<i>Meccanica dei quanti</i>	0.67±0.14	0.78±0.17	-2,302**	0.33±0.25	0.65±0.20	-5.021*
<i>Misura</i>	0.73±0.15	0.66±0.16	1.572ns	0.67±0.15	0.42±0.19	4.654*
<i>Fisica dell'atomo e del legame chimico</i>	0.71±0.25	0.63±0.20	1.154ns	0.50±0.34	0.47±0.24	0.350ns
<i>Proprietà elettroniche della materia</i>	0.64±0.20	0.56±0.16	1.619ns	0.52±0.24	0.37±0.21	2.340**

\*  $p < 10^{-4}$ ; \*\* $p < 0.05$

Tabella III.3

Usando la valutazione con credito parziale, i risultati in tabella mostrano che il gruppo di controllo ottiene un punteggio significativamente maggiore del gruppo di trattamento nelle aree del regime semiclassico e della meccanica dei quanti. Nelle altre tre aree, il gruppo di trattamento ottiene risultati migliori ma la differenza non è statisticamente significativa.

Usando il metodo dicotomico, i risultati sono molto simili, tranne che adesso le differenze tra il gruppo di controllo e quello di trattamento sono statisticamente significative. Possiamo quindi concludere che il gruppo di controllo ottiene più risposte parzialmente corrette rispetto al gruppo di trattamento nelle aree che riguardano la misura e le proprietà della materia.

Tale evidenza emerge anche dal grafico della difficoltà delle domande per il gruppo di controllo (Figura 3.9). Notiamo che le domande più facili sono la Q13 e la Q21, mentre le più difficili risultano la Q18 e la Q2.

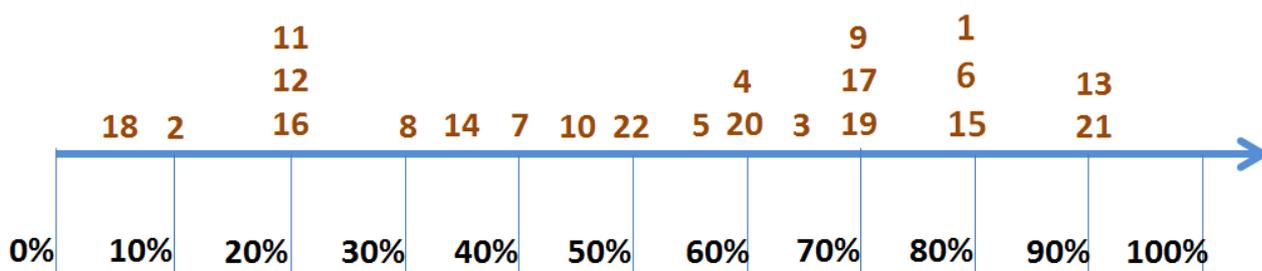


Figura 3.9 Distribuzione delle domande del questionario secondo le loro difficoltà (gruppo di controllo)

Lo scatter plot in Figura 3.10 mostra le difficoltà delle domande per i due gruppi. Solo due domande (Q15, Q20) sono vicine alla bisettrice del grafico (luogo geometrico delle domande con la stessa difficoltà nei due gruppi). Mediamente, la fisica dell'atomo e del legame chimico, le proprietà della materia hanno la stessa difficoltà. Il regime semiclassico e la meccanica dei quanti invece hanno difficoltà significativamente diverse. Tale evidenza conferma i risultati ottenuti con il t-test.

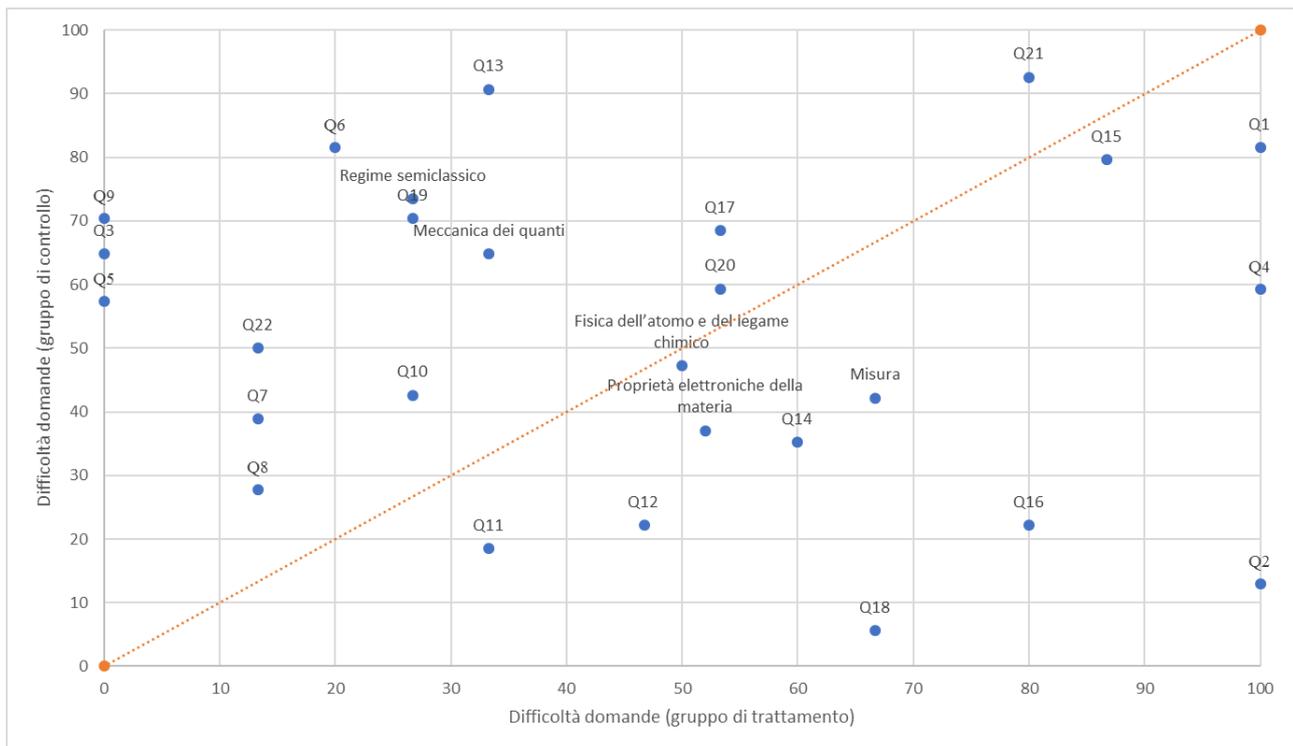


Figura 3.10. Difficoltà delle domande del gruppo di controllo vs. gruppo di trattamento.

Studiamo infine in maniera quantitativa la distribuzione delle risposte degli studenti del gruppo di controllo riguardo i temi trattati nel questionario. In Figura 3.11 riportiamo il punteggio medio normalizzato per ogni tema, utilizzando entrambi i metodi di valutazione (credito parziale e dicotomico). I punteggi normalizzati nel caso della valutazione a credito parziale confermano che il regime semiclassico è stata l'area più facile per gli studenti del gruppo di controllo (media =  $0.82 \pm 0.21$ ). L'area più difficile è invece risultata quella legata alla struttura della materia (media =  $0.56 \pm 0.16$ ). Le differenze tra le varie aree del questionario tuttavia non sono statisticamente significative utilizzando questo metodo di valutazione ( $F = 1.927$ ,  $p = 0.152$ ). Un andamento simile emerge se si analizzano i dati con il metodo dicotomico, per il quale le aree non presentano difficoltà significativamente differenti ( $F = 1.584$ ,  $p = 0.224$ ).

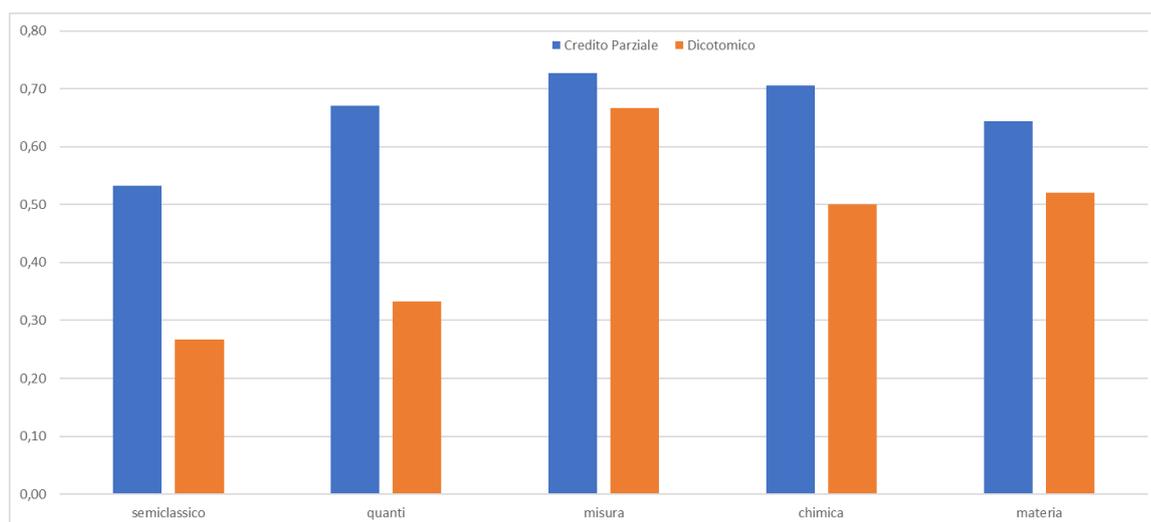


Figura 3.11 Punteggi medi normalizzati ottenuti dal gruppo di trattamento nelle aree del test utilizzando i due metodi di valutazione

### 3.1.3. Analisi della percezione della difficoltà e dell'ambiguità delle domande

Per quel che riguarda la percezione di difficoltà, il punteggio medio del gruppo di trattamento è  $2.8 \pm 0.7$ , quello del gruppo di controllo  $2.5 \pm 0.5$ . La differenza non è statisticamente significativa ( $t = 1.348$ ,  $df = 64$ ,  $p = 0.182$ ). L'affidabilità della scala è ottima (alpha di Cronbach = 0.92). Riguardo alle singole domande, la media della difficoltà percepita dagli studenti del gruppo di trattamento è  $3.0 \pm 0.6$ , mentre quella del gruppo di controllo  $2.4 \pm 0.5$ . La differenza è statisticamente significativa ( $t = 4.281$ ,  $df = 21$ ,  $p < 10^{-4}$ ). Tale risultato è plausibilmente dovuto al fatto che la percezione di difficoltà media è significativa per 9 delle domande: Q9, Q21 (regime semiclassico); Q1, Q19 (meccanica dei quanti), Q16, Q18 (misura), Q20 (Fisica dell'atomo e del legame chimico), Q11, Q17 (Proprietà elettroniche della materia). In particolare, tutti i temi sono stati considerati più difficili dal gruppo di trattamento (si veda anche lo scatterplot in Figura 3.12), ma la differenza è significativa solo per i temi regime semiclassico ( $t = 3.445$ ,  $df = 60$ ,  $p = 0.001$ ) e misura ( $t = 2.332$ ,  $df = 63$ ,  $p = 0.02$ ).

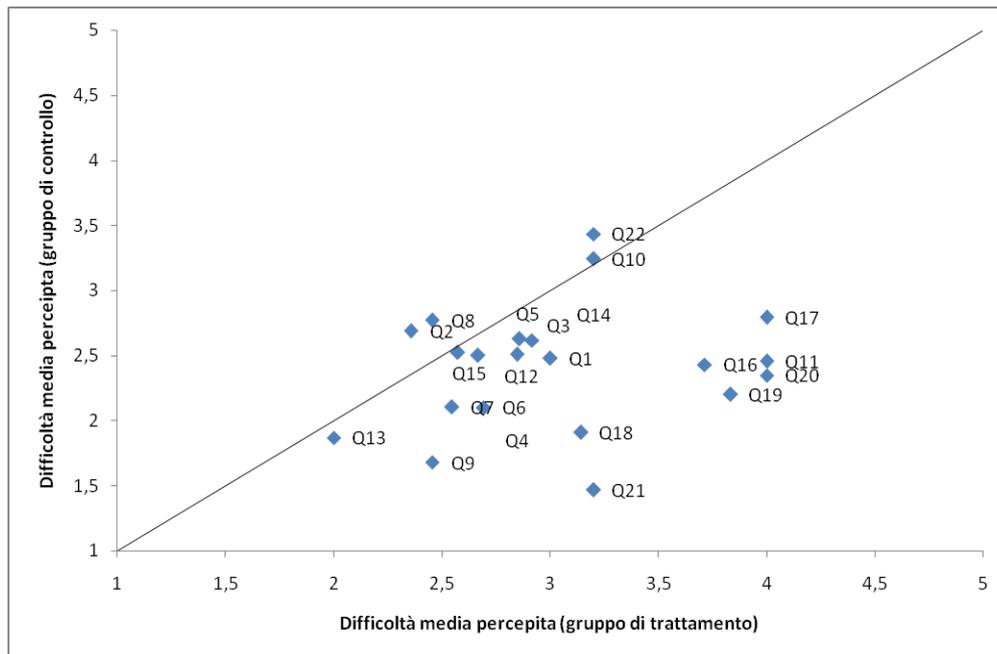


Figura 3.12; correlazione tra la difficoltà media percepita dal gruppo di trattamento e dal gruppo di controllo

Considerando il campione nella sua interezza, la correlazione tra i punteggi ottenuti e la percezione della difficoltà delle domande è, come atteso, negativa. In particolare, considerando la valutazione a credito parziale il coefficiente di correlazione è  $-0.40$  ( $p = 0.001$ ), mentre è  $-0.33$  ( $p=0.008$ ) per il punteggio dicotomico. Riportiamo nelle figure 3.13 e 3.14 lo scatterplot dei punteggi vs. punteggio medio della percezione della difficoltà.

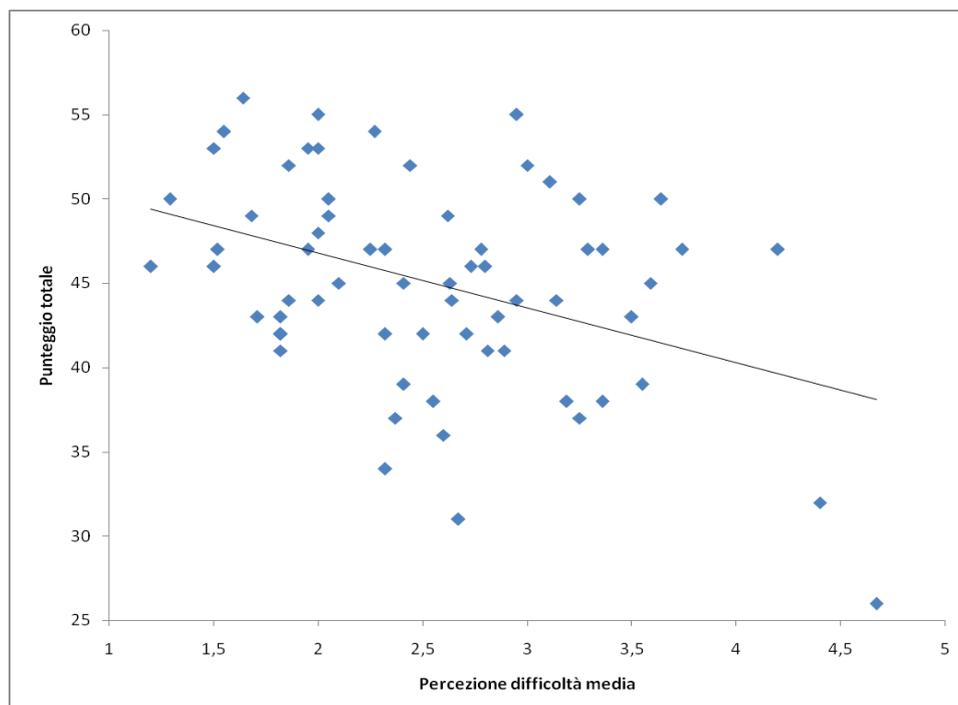


Figura 3.13; correlazione tra il punteggio totale e la percezione di difficoltà media

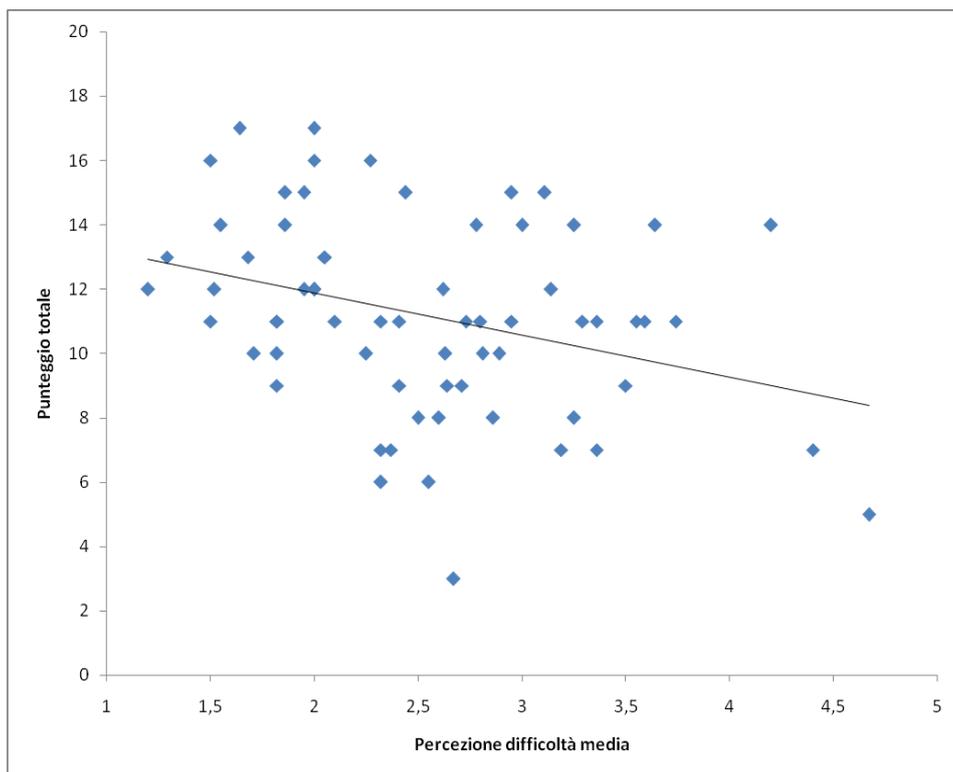


Figura 3.14 Scatter plot dei punteggi ottenuti con la valutazione a credito parziale vs. percezione della difficoltà media (tutto il campione)

Per quel che riguarda la percezione di ambiguità, il punteggio medio del gruppo di trattamento è  $2.5 \pm 0.8$ , quello del gruppo di controllo  $3.0 \pm 0.8$ . La differenza è statisticamente significativa ( $t = -2.136$ ,  $df = 65$ ,  $p = 0.04$ ). L'affidabilità della scala è ottima (alpha di Cronbach = 0.89). Riguardo alle singole domande, la media della difficoltà percepita dagli studenti del gruppo di trattamento è  $2,7 \pm 0,6$ , mentre quella del gruppo di controllo  $3,0 \pm 0,5$ . La differenza non è statisticamente significativa in questo caso ( $t = -1.371$ ,  $df = 21$ ,  $p = 0.185$ ). La percezione di ambiguità media è comunque significativa per 9 delle domande: Q5, Q21 (regime classico); Q1, Q3, Q10 (meccanica dei quanti), Q4, Q6 (misura), Q8 (Fisica dell'atomo e del legame chimico), Q2 (Proprietà elettroniche della materia). In particolare, il gruppo di trattamento considera più ambigue solo le tre domande nell'area semiclassica, in media. Le differenze tra i due gruppi sono significative per i temi quanti ( $t = -2.250$ ,  $df = 65$ ,  $p = 0.028$ ), atomo ( $t = -2.065$ ,  $df = 60$ ,  $p = 0.043$ ) e misura ( $t = -2.574$ ,  $df = 64$ ,  $p = 0.012$ ). Tali risultati sono confermati dalla scatterplot in figura 3.14.

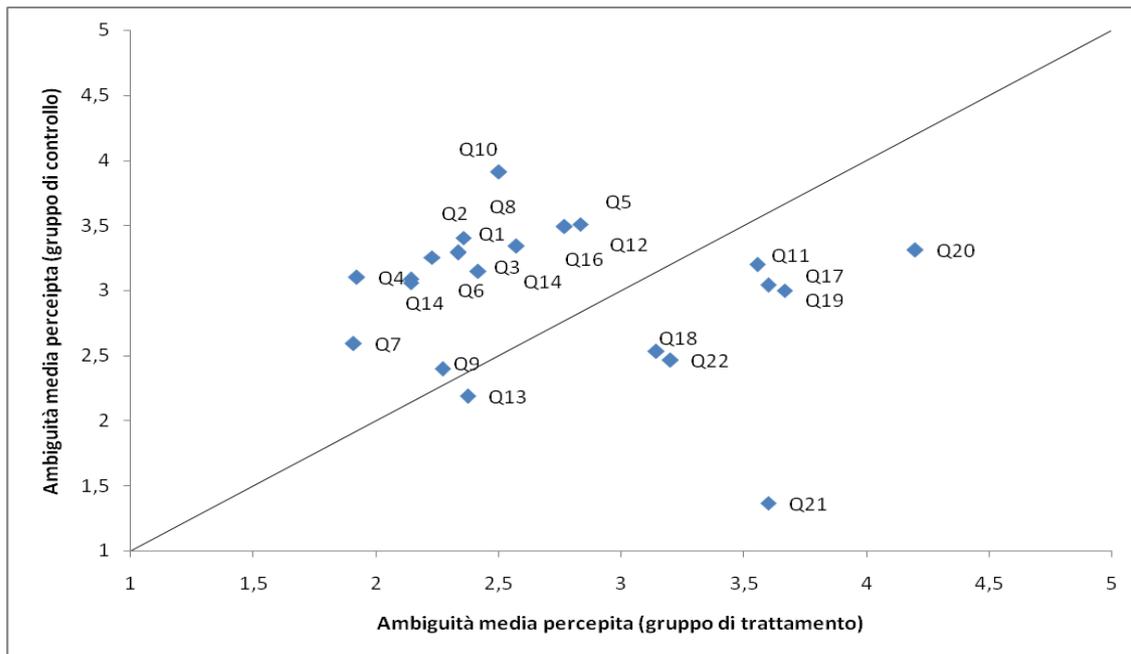


Figura 3.15; correlazione tra l'ambiguità media percepita dal gruppo di trattamento e dal gruppo di controllo

### 3.1.4 Idee dei docenti del corso di laurea in fisica sulla didattica della meccanica quantistica

Gli obiettivi di un insegnamento della meccanica quantistica al liceo sono stati discussi tramite intervista insieme ad alcuni docenti del dipartimento di Fisica dell'Università di Napoli "Federico II". Tali interviste hanno contribuito a spiegare anche alcuni risultati emersi dalle risposte degli studenti al questionario. I docenti esperti appartengono a diversi settori disciplinari: fisica teorica, struttura della materia, fisica particellare.

L'intervista era composta da due parti: una prima parte in cui il docente esperto analizzava una per una le domande del questionario evidenziando eventuali difficoltà, ambiguità e criticità nel contesto di un insegnamento non specialistico della meccanica quantistica; una seconda parte in cui veniva chiesto di esprimere la propria concezione sulle finalità didattiche che dovrebbe assumere l'insegnamento della meccanica quantistica. Le domande proposte sono le seguenti:

- Quali pensa debbano essere gli obiettivi fondamentali dell'insegnamento della meccanica quantistica?
- Quali pensa siano gli argomenti irrinunciabili da trattare?
- Quale approccio ritiene più adatto?

Qui si riporteranno i risultati della seconda parte. Sarà possibile così far emergere le differenze tra l'approccio proposto e le idee sull'insegnamento della meccanica quantistica dei docenti scelti del corso di laurea in fisica.

### 3.2 Interviste con i docenti

Le interviste hanno coinvolto cinque docenti di Fisica del nostro Dipartimento, impegnati in diverse aree di ricerca che coinvolgono l'utilizzo di conoscenze di meccanica quantistica. Come già detto precedentemente l'intervista è strutturata tramite presentazione di tre domande relative agli obiettivi didattici, agli argomenti irrinunciabili nello studio della meccanica quantistica e al metodo di insegnamento usualmente adottato.

Si presenteranno ora i risultati delle interviste ai docenti universitari i quali saranno identificati con i codici:

Docente 1, Docente 2, Docente 3, Docente 4, Docente 5.

Le domande componenti l'intervista sono identificate dalla seguente numerazione:

- 1) Quali pensa debbano essere gli obiettivi fondamentali di questo insegnamento?
- 2) Quali pensa siano gli argomenti irrinunciabili da trattare? In quale ordine dovrebbero essere posti?
- 3) Quale approccio ritiene più adatto? (Storico, fenomenologico,...)

(i numeri indicano la domanda associata alla risposta)

Docente 1

- 1) Il docente ritiene particolarmente importante e costruttivo insistere sulla frattura tra la fisica classica e la fisica moderna, in particolar modo sulla differenza tra determinismo classico e determinismo quantistico e sui concetti di probabilità per la meccanica classica e quantistica. Ritiene inoltre istruttivo mettere in evidenza il dualismo onda-particella. Crede sia importante fornire una cultura elementare alla classe, eviterebbe dunque insegnamenti di tipo "verticale" volti a fortificare gli alunni particolarmente inclini alla materia: "possono approfondire da soli il docente deve dare a tutti l'opportunità di affacciarsi sul nuovo argomento, anche ai meno inclini". Ritiene inoltre che l'insegnamento debba limitarsi a fortificare le basi senza dare un dominio troppo ampio al programma.

- 2) Il docente ritiene tra gli argomenti irrinunciabili l'esperimento della doppia fenditura per toccare concetti come il dualismo onda - particella e di probabilità. L'effetto fotoelettrico, il significato di  $h$  e il concetto di costante universale,
- 3) Il docente mostra preferenze per un approccio fenomenologico con sussidi di simulazione.

## Docente 2

1. Il docente considera tra i principali obiettivi scolastici lo studio di fenomeni a livello atomico e microscopico, mettendo a confronto una loro interpretazione secondo la fisica classica e moderna. Evidenzia il dualismo onda-particella e i concetti di spettri e di energia discontinua.
2. Tra gli argomenti irrinunciabili da trattare al V liceo il professore consiglia l'effetto fotoelettrico, lo scattering di Rutherford e la struttura dell'atomo.
3. Il docente considera particolarmente significativo un approccio fenomenologico sfruttando magari effetto fotoelettrico, scattering, esperienza di Franck-Hertz. Trova inoltre utile far svolgere esperienze di laboratorio agli studenti (in accordo con le esigenze economiche della scuola nel fornire materiale).

Il docente ritiene importante un approccio sperimentale, per mettere in evidenza la nascita e l'esigenza di una nuova teoria; cita ad esempio l'esperienza di Michelson e Morley e di come a seconda dei risultati la fisica si sia evoluta in un certo modo. Quindi un approccio sperimentale che parte dai problemi della fisica classica può essere molto significativo per capire cosa stiamo facendo e come un valore "disatteso" di una teoria possa essere importante per la teoria stessa della fisica e far capire come evolve la stessa.

### Docente 3

- 1) Il docente chiarisce di non essere particolarmente favorevole all'insegnamento della meccanica quantistica in quinto liceo. Ammesso pure che sia il caso di insegnarla in una classe liceale di buon livello, darebbe rilievo a quei fatti sperimentali che dimostrano come l'estensione della meccanica classica e dei concetti del mondo macroscopico applicati al microscopico non siano corretti, discutendone gli esperimenti. Il secondo obiettivo sarebbe lo sviluppo dei nuovi concetti della meccanica quantistica. Darebbe importanza ai concetti che magari si possono dare per scontato nel mondo macroscopico e che non possono essere dati per scontato nel mondo microscopico, tendendo magari a determinare i postulati o almeno le ragioni sperimentali che stanno dietro questi: un po' remando in quella direzione nei limiti formali di una classe di liceo".
- 2) Il docente considera importanti definire le basi sperimentali della nuova teoria come l'effetto fotoelettrico e il corpo nero (in maniera ovviamente molto semplificata), in modo da presentare esperienze su radiazioni e su particelle.
- 3) Il docente preferisce decisamente un approccio storico, oltre che per raccontare come realmente si sia evoluta la fisica, anche per evidenziare i modi di apprendimento e di pensare dell'uomo.

### Docente 4

- 1) Il docente si mostra favorevole all'insegnamento della meccanica quantistica al liceo. Darebbe rilievo alla proposizione di una fisica non dogmatica e all'idea che tutto può essere messo in discussione.  
Si soffermerebbe in particolar modo sui concetti di probabilità, di determinismo quantistico e sul principio di Heisenberg. Farebbe particolare attenzione anche nella presentazione del metodo scientifico, sia come mezzo che ha messo in "crisi" la

meccanica classica, sia come strumento fondamentale della fisica facendo ove possibile collegamenti interdisciplinari.

- 2) Gli argomenti che ritiene difficilmente rinunciabili in una classe liceale includono: la crisi sperimentale della meccanica classica, la trattazione della stabilità dell'atomo e il corpo nero
- 3) Per raggiungere gli obiettivi sopra elencati, il docente ritiene più opportuno un approccio fenomenologico, magari con qualche cenno di percorso storico.

#### Docete 5

- 1) Il docente ritiene fondamentale proporre un insieme di concetti e modelli che permettano di acquisire conoscenze in modo da non far percepire i vari ambiti della fisica come disconnessi tra di loro. Il docente si preoccuperebbe principalmente di capire se la fisica classica così come insegnata permette di capire che ci si muove connettendo due ambiti, uno legato a modelli e teorie, l'altro alla fenomenologia. Riguardo la parte formale insisterebbe sul concetto di probabilità e sul suo significato, ricordando che in fisica ci si riferisce a modelli interpretativi, che descrivono la realtà, ma che non sono la realtà. L'approccio del docente sarebbe quantitativo cercando se possibile di arrivare all'equazione di Schrodinger, facendo attenzione a darne giusto significato. Ritiene comunque tra gli obiettivi principali far capire agli studenti come ricavare un modello da un approccio fenomenologico perché: fare ciò già con la meccanica classica può essere molto importante nella comprensione della meccanica quantistica".
- 2) Il docente illustrerebbe gli esperimenti che hanno messo in crisi la meccanica classica, facendo capire cosa bisogna fare in questo diverso ambito per far interpretare correttamente il fenomeno. Considera un errore tipico nei manuali la presentazione di corpo nero, effetto fotoelettrico, spettri, passaggio dal continuo al discreto e così via perché questo modo di agire non tiene conto che gli studenti non hanno studiato bene questi fenomeni e quindi non saprebbero interpretare bene la catastrofe ultravioletta ecc. Il docente cercherebbe di curare anzitutto fenomenologia ed esperimenti (cita in particolare gli spettrofotometri).

3) Il docente considera l'approccio storico utile ma non nel modo standard. Spesso nel trattare storicamente i fenomeni si trascura il fatto che dietro certe posizioni ci sono visioni di carattere filosofico e teorico profondo e certi ragionamenti e concetti non è detto siano subito alla portata dei ragazzi.

L'approccio fenomenologico dovrebbe essere inteso come una strategia per mettere gli studenti nella situazione di cogliere il significato di concetti e modelli.

### *Commenti alle interviste*

Riassumendo, dalle interviste si ricavano alcune posizioni condivise.

Per quello che riguarda l'aspetto generale, il tema della "crisi della fisica classica" è stato menzionato varie volte. Nel percorso sperimentato la "crisi" non è discussa sul piano storico ma affermando che gli esperimenti sul mondo "micro" non possono essere spiegati dalla fisica classica. Gli esempi trattati sono gli spettri atomici, il corpo nero, l'effetto fotoelettrico, la stabilità dell'atomo. Per quello che riguarda gli obiettivi, il percorso sperimentato ne condivide la maggior parte, ma esclude la meccanica ondulatoria che postpone a una fase di approfondimento.

Si può fare un commento simile per gli argomenti irrinunciabili: ancora una volta sono tutti considerati, escluso l'esperimento della doppia fenditura.

## **Conclusioni**

Il lavoro svolto, ci ha fornito varie e incoraggianti indicazioni sulla forma e costruzione del percorso proposto. Malgrado lo scarso significato statistico dei dati, si è riusciti comunque a tracciare un'idea della funzionalità e dell'applicabilità del percorso proposto.

La regolarità dei dati ottenuti e la somiglianza con il campione di controllo, fanno ben sperare nella bontà del campione liceale che anche se esiguo assume la forma che ci aspetteremmo e che si vuole ottenere per un campione più ampio. La stessa esperienza didattica ha evidenziato una diversa efficacia didattica sia delle sezioni proposte che dei modi di presentazione dell'argomento. Il metodo di valutazione del percorso tramite questionario, seppur accettabile è da raffinare, riducendo ancor più le percezioni di ambiguità degli studenti nella lettura del singolo quesito, ed aumentando la sensibilità dello stesso questionario nel riuscire a individuare concezioni didattiche errate causate dallo stesso percorso. Il confronto didattico con le opinioni di esperti di fisica quantistica si è rivelato un fondamentale spunto di riflessione e di autocritica, finalizzate ad attuare migliorie alla stessa strategia e composizione didattica del percorso.

In altre parole, il campione pilota si è comportato molto bene e sia il confronto con gli studenti universitari che con gli esperti di fisica quantistica confermano la potenziale funzionalità ed efficacia del percorso evidenziandone allo stesso tempo pregi e difetti sia dello stesso percorso che del metodo di valutazione e dandoci nuovi spunti e idee di lavoro.

Si può concludere dicendo che il ramo di ricerca che si è scelto di seguire mostra delle potenzialità, quindi si continuerà ad effettuare ricerca nella stessa direzione cercando di rendere più funzionale ed efficace il percorso didattico proposto e testandolo nell'immediato futuro su campioni statisticamente significativi.

## Bibliografia

ARONS.A.B (1992), *Guida all'insegnamento della fisica*, Zanichelli, Bologna (York 1990)

BESSION U., MALGIERI M. (2018) *Insegnare la fisica moderna*

GIANELLI A., TARSITANI C. (2003), *Un progetto di introduzione alla meccanica quantistica per i laureati in matematica*, in "La Fisica nella Scuola", 36,3, pp. 103-14.

GHIRARDI G. C., GRASSI R., MICHELINI M. (1997) , *Introduzione delle idee della fisica quantistica e il ruolo del principio di sovrapposizione lineare* , in "La Fisica nella Scuola" ,30,3 suppl.,Quaderno 7,pp 46-57

HOBSON A. (2005), *Electrons as Field Quanta: A Better Way to Teach Quantum Physics in Introductory General Physics Courses*, in "American Journal of Physics", 73,7 pp. 630-4.

ID. (2013), *There Are No Particles, There Are Only Fields*, in "American Journal of Physics", 81,3,pp.211-23.

KALKANIS G.,HADZIDAKI P.,STRAVROU D.(2003), *An Instructional Model for a Radical Conceptual Change towards Quantum Mechanics Concepts*, in "Science Education",87,2, pp.257-80.

KE J.-L, MONK M., DUSCHL R.(2005). *Learning Introductory Quantum Physics: Sensori-Motor Experiences and Mental Models*, in "International Journal of Science Education",27,13, pp.1571-94.

MÜLLER R., WIESNER H.(2002),*Teaching Quantum Mechanics on an Introductory Level*, in "American Journal of Physics", 70,3 pp.200-9

PETRI J.,NIEDDERER H.(1998), *A Learning Pathway in High-School Level Quantum Atomic Physics*, in "International Journal of Science Education", 20,9, pp. 1075-88

STYER D.F.(1996), *Common Misconceptions Regarding Quantum Mechanics*, in "American Journal of Physics",64,1, pp. 31-4

TARSITANI C.(2008), *Le linee essenziali di un approccio alla fisica quantistica. Problemi didattici e concettuali*, in P.Guidoni, O.Levrini (a cura di), *Approcci e proposte per l'insegnamento-apprendimento della fisica a livello preuniversitario*, Forum, Udine, pp.191-208

ID.(2009), *Dalla fisica classica alla fisica quantistica*, Editori Riuniti, Roma.

VOKOS S. et al.(2000),*Student Understanding of the Wave Nature of Matter: Diffraction and Interference of Particles*, in “American Journal of Physics” , 68,S<sub>1</sub> ,pp. S<sub>42</sub>-S<sub>51</sub>

## **Ringraziamenti**

Non posso esimermi dal ringraziare il gruppo di ricerca didattica che mi ha seguito e guidato in questo lavoro per la pazienza e la dedizione dimostratami. Un ringraziamento è doveroso rivolgerlo ai docenti resasi disponibili per le interviste e agli stessi alunni, liceali e universitari per la disponibilità e serietà mostrata nello svolgimento del questionario.

Infine un grazie speciale alle persone che mi hanno sempre sostenuto.